

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE
EN GÉNIE PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

PAR
Kahina KOULOUGLI

COMBINAISON DE LA COLLABORATION HORIZONTALE ET VERTICALE POUR
L'OPTIMISATION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT INTERNATIONALE

MONTREAL, LE 12 AOÛT 2015

©Tous droits réservés, Kahina koulougli, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Amin Chaabane, directeur de mémoire
Génie Production Automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Mustapha Ouhimmou, président du jury
Génie Production Automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, membre du jury
Génie Production Automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 JUILLET 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à mon directeur de recherche M. Amin Chaabane, professeur au sein du département GPA de l'École de technologie supérieure, pour ses précieux conseils et indications qui m'ont aidé à progresser et atteindre mes objectifs durant ces deux dernières années.

Je remercie tous les membres du laboratoire Numérix de m'avoir accueilli si chaleureusement et intégré rapidement dans l'équipe. Je remercie particulièrement Melle. Marthy-Stivaliz Garcia-Alvarado doctorante au sein du laboratoire Numérix pour m'avoir accordé autant de temps et d'intention ce qui m'a permis d'avancer plus rapidement dans mon travail.

Je remercie M. Jean Bruno Lapointe directeur général de l'entreprise GlobAction Management de m'avoir accordé du temps pour répondre à toutes mes questions et apporté énormément d'informations pour l'avancement de mon travail.

Je tiens à remercier Le Centre Interdisciplinaire de Recherche en Opérationnalisation du Développement Durable (CIRODD) de m'avoir permis de faire un stage international qui m'a été d'une aide précieuse dans ma recherche. Je remercie tous les membres du Laboratoire LOSI de l'Université de Technologie de Troyes de leur accueil au sein de l'équipe. Je remercie tout particulièrement, M. Lionel Amodeo, professeur chercheur au sein du LOSI, d'avoir accepté de m'accueillir et de m'encadrer durant toute la période de mon stage en France. Je remercie aussi M. Yassine Ouazen maître de conférences au sein du LOSI pour ses précieuses recommandations. Je remercie aussi M. Mohamed Afilal étudiant au doctorat au LOSI pour son temps et ses conseils pertinents.

Et surtout, je remercie toute ma famille qui m'a toujours soutenue et encourager à aller de l'avant, sans elle je n'aurais pu accomplir tout ce que j'ai réalisé à date.

COMBINAISON DE LA COLLABORATION HORIZONTALE ET VERTICALE POUR L'OPTIMISATION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT INTERNATIONALE

Kahina KOULOGLI

RÉSUMÉ

De nos jours, la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale (CAI) est devenue inévitable, car les entreprises élargissent leurs chaînes d'approvisionnement à des localisations internationales. Afin de satisfaire la demande du client de la chaîne d'approvisionnement internationale au bon moment et à un coût total minimal, la planification des livraisons et le dimensionnement des lots sont nécessaires. De plus, les entreprises adoptent de nouvelles techniques de gestion, dont la collaboration verticale et horizontale pour atteindre la durabilité. Ceci rend la gestion du transport collaboratif un facteur important dans la gestion de la CAI. Dans ce travail, nous analysons l'impact de la collaboration horizontale et verticale sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Le réseau étudié est constitué de plusieurs fournisseurs, clients et produits avec un horizon de planification multi période. Un modèle d'aide à la décision basé sur deux modèles d'optimisation mathématiques linéaires en nombre mixte (MILP), qui traduit la collaboration entre les clients et les fournisseurs par la consolidation des livraisons, est présenté.

Mots clés : Chaîne d'approvisionnement internationale, transport collaboratif, durabilité, optimisation.

COMBINAISON DE LA COLLABORATION HORIZONTALE ET VERTICALE POUR L'OPTIMISATION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT INTERNATIONALE

Kahina KOULOGLI

ABSTRACT

While organizations expand their supply chain into international locations to source or sell globally, management of Global Supply Chain (GSC) becomes unavoidable. As companies have to be aware of the cost and sustainable development requirement, transportation collaboration might play an important role in the management of GSC. In this study, we analyze the impact of transportation collaboration in shipment planning and lot sizing through a GSC. The network is composed of suppliers, customers and different transportation modes. A multi-product and a multi-period mixed integer linear programming optimization methodology (MILP) is developed to deploy vertical and horizontal collaboration between suppliers and customers through shipment consolidation.

Keywords: Global Supply Chain, sustainability, transportation collaboration, optimization.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	13
1.1 Chaîne d’approvisionnement internationale	13
1.1.1 Introduction.....	13
1.1.2 Chaîne d’approvisionnement internationale	18
1.1.3 Problèmes de planification des livraisons dans la gestion de la chaîne d’approvisionnement.....	19
1.1.4 Problème de dimensionnement des lots dans la chaîne d’approvisionnement internationale.....	21
1.2 Collaboration horizontale et verticale dans le transport	23
1.2.1 Mise en contexte	23
1.2.2 Collaboration horizontale.....	27
1.2.3 Collaboration verticale.....	29
1.2.4 Collaboration horizontale et verticale.....	30
1.2.5 Conclusion	32
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	35
2.1 Introduction.....	35
2.2 Étapes de résolution	36
2.3 Conclusion	38
CHAPITRE 3 MODÈLE DE COLLABORATION HORIZONTALE ENTRE LES CLIENTS	39
3.1 Introduction.....	39
3.2 Présentation de la configuration du réseau de CAI étudié.....	39
3.3 Modèle mathématique.....	42
3.3.1 Ensembles et indices.....	42
3.3.2 Paramètres du modèle mathématique	42
3.3.3 Variables de décision du modèle mathématique.....	43
3.3.4 Fonction-objectif du modèle mathématique	44
3.3.5 Contraintes du modèle mathématique.....	45
3.4 Étude de cas et résultats	47
3.4.1 Collecte de données	47
3.4.2 Scénario de base.....	51
3.4.3 Collaboration entre les clients.....	54
3.4.4 Impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la GCAI	56
3.4.5 Impact de la consolidation des livraisons sur les clients.....	59
3.5 Analyse de sensibilité	62
3.5.1 Variation du rapport de densité des produits	62
3.6 Conclusion	63

CHAPITRE 4 MODÈLE DE COLLABORATION VERTICALE ET HORIZONTALE ENTRE LES CLIENTS ET LES FOURNISSEURS	65
4.1 Introduction	65
4.2 Modèle mathématique	66
4.2.1 Ensembles et indices	67
4.2.2 Paramètres du modèle mathématique	67
4.2.3 Variables de décision du modèle mathématique	69
4.2.4 Fonction objectif du modèle mathématique	70
4.2.5 Contraintes du modèle mathématique	71
4.3 Étude de cas	73
4.3.1 Collecte de données	74
4.3.2 Scénario de base	74
4.3.2.1 Configuration de base	74
4.3.2.2 Configuration de la collaboration horizontale et verticale	76
4.3.3 Impact de la collaboration horizontale et verticale sur la GCAI	79
4.4 Analyse de sensibilité	80
4.4.1 Variation du coût unitaire de stockage	80
4.4.2 Variation du rapport de densité des produits dans le cas de la collaboration horizontale et verticale	81
4.5 Conclusion	82
CONCLUSION	85
RECOMMANDATIONS	87
ANNEXE I COÛT À L'EXPORTATION DES CONTENEURS (US \$ par conteneur)	91
ANNEXE II LISTE DES ADRESSES DES ENTREPRISES DE L'ÉTUDE DE CAS	98
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	99

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Aperçu de la revue de littérature dans le domaine du transport collaboratif31
Tableau 3.1	Paramètres de l'étude de cas50
Tableau 3.2	Paramètres supplémentaires.....50
Tableau 3.3	Extrait de la planification des livraisons du mode de transport LCL52
Tableau 3.4	Répartition des coûts du scénario de base.....52
Tableau 3.5	Résultats du scénario de base (sans consolidation).....54
Tableau 3.6	Tableau comparatif des résultats de la collaboration horizontale57
Tableau 3.7	Résultats du scénario de collaboration horizontale.....58
Tableau 3.8	Gain de la collaboration horizontale58
Tableau 3.9	Résultats du changement de l'effet de consolidation.....60
Tableau 4.1	Paramètres utilisés dans le cas de dimensionnement des lots.....74
Tableau 4.2	Résultats de la configuration de base du dimensionnement des lots75
Tableau 4.3	Résultats du dimensionnement des lots76
Tableau 4.4	Tableau comparatif des résultats des trois configurations de collaboration80

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale1
Figure 0.2	Collaboration verticale versus collaboration horizontale4
Figure 1.1	Schéma descriptif du mode de transport FCL.....25
Figure 1.2	Schéma descriptif du mode de transport LCL26
Figure 2.1	Méthodologie de recherche38
Figure 3.1	Réseau du transport dans la chaîne logistique internationale40
Figure 3.2	Configuration du transport collaboratif41
Figure 3.3	Description du conteneur41
Figure 3.4	Représentation des sites de l'étude de cas sur <i>LogicNet</i>48
Figure 3.5	Représentation des voies fournisseurs-clients de l'étude de cas sur <i>LogicNet</i>49
Figure 3.6	Résultat de l'étude de cas52
Figure 3.7	Comparaison entre les modes de transport maritime53
Figure 3.8	Cas 1 : Variation du nombre de conteneurs durant l'horizon de planification55
Figure 3.9	Cas 2 : Variation du nombre de conteneurs durant l'horizon de planification56
Figure 3.10	Variation du pourcentage de gain en fonction de la distribution de la demande59
Figure 3.11	Répartition des coûts de stock.....61
Figure 3.12	Répartition des coûts d'utilisation des conteneurs62
Figure 3.13	Variation de la consolidation en fonction de la densité des produits.....63
Figure 4.1	Représentation de la distribution de la demande dans le problème de collaboration65

Figure 4.2	Représentation du problème de dimensionnement des lots.	66
Figure 4.3	Configuration de dimensionnement des lots: variation des lots à commander sur l'horizon de planification.....	75
Figure 4.4	Scénario1: Variation des commandes des clients sur l'horizon de planification.	77
Figure 4.5	Scénario 1: Variation du niveau des stocks sur l'horizon de planification.	77
Figure 4.6	Scénario 2: Variation des commandes des clients à travers l'horizon de planification.	78
Figure 4.7	Scénario 2 : Variation du niveau des stocks à travers l'horizon de planification.	79
Figure 4.8	Variation du niveau des stocks en fonction du coût unitaire de stockage .	81
Figure 4.9	Variation de la consolidation des livraisons en fonction de la densité des produits dans le cas de la collaboration horizontale et verticale.....	82

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	<i>Analytic hierarchy process.</i> Classification hiérarchique des processus.
ALENA	Accord de libre-échange nord-américain.
ASEAN	Association des nations de l'Asie du Sud-Est.
CAI	Chaîne d'Approvisionnement Internationale.
CTM	Management du Transport Collaboratif.
ERP	<i>Enterprise Resource Planning.</i> Progiciel de gestion intégré.
FCL	<i>Full Container Load.</i> Conteneur complet.
GCAI	Gestion de la Chaîne d'Approvisionnement Internationale.
GES	Gaz à Effet de Serre.
IED	<i>Industrial Emissions directive.</i> Directives des émissions industrielles.
LCL	<i>Less than Container Load.</i> Chargement partiel d'un conteneur.

XVIII

MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming.</i> Programmation linéaire en nombres mixtes.
NDMC	<i>Capacitated Network Design Model.</i> Modèle de conception de réseau logistique avec contraintes de capacité.
OMC	Organisation Mondiale du Commerce.
PME	Petite et Moyenne Entreprise.
SMILP	<i>Stochastic Mixed Integer Linear Programming.</i> Programmation linéaire stochastique en nombres mixtes.
SPEDE	Système de Plafonnement d'Échange de Droits d'Émissions.
TI	Technologie de l'Information.
UE	Union Européenne.
WCI	Western Climate Initiative.

INTRODUCTION

De nos jours, la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale (GCAI) suscite l'intérêt des industriels et des chercheurs. Elle devient un point important à maîtriser et à optimiser, car les entreprises de différents secteurs élargissent leur chaîne d'approvisionnement à des localisations internationales pour s'approvisionner ou vendre à l'international (Figure 0.1) afin de réduire les coûts et augmenter les profits.



Figure 0.1 Réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale

Les produits finaux de la chaîne d'approvisionnement sont composés principalement de matières premières ou services d'autres pays. Pour satisfaire la demande des clients, l'utilisation des marchés internationaux est inévitable (Manuj et Mentzer, 2008). La chaîne d'approvisionnement est devenue plus complexe et difficile à gérer. Elle doit faire face aux

changements continus des systèmes manufacturiers et financiers et les limites géographiques et politiques du monde (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007). Cette complexité apporte plus de défis pour les chercheurs et les industriels surtout au niveau de la planification de la logistique de la GCAI. Cet intérêt est aussi démontré par l'augmentation du nombre d'articles publiés dans le domaine de la GCAI durant ces dernières années (Benjaafar, Li et Daskin, 2013; Brandenburg *et al.*, 2014; Fahimnia *et al.*, 2014a; Fahimnia *et al.*, 2014b; Godichaud et Amodeo, 2015). Cependant, il est encore difficile d'établir une base de connaissance cohérente pour diriger la recherche dans le domaine de GCAI (Brandenburg *et al.*, 2014; Manuj et Mentzer, 2008).

L'un des plus importants problèmes dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale est la planification des livraisons du produit fini entre plusieurs acteurs (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011). Afin de satisfaire la demande du client, il est important de déterminer la quantité de chaque produit à livrer de chaque fournisseur pour chaque client à chaque période de temps. Dans la chaîne d'approvisionnement internationale (CAI), les fournisseurs et les clients sont généralement localisés dans des pays différents. La livraison du produit devient donc plus difficile et peut prendre plus de temps, c'est pour cela que la planification des livraisons doit être faite avec plus de précisions pour satisfaire la demande finale au bon moment.

En outre, durant les dernières décennies, les chercheurs ont étudié les problèmes de dimensionnement des lots dans différentes directions (Figure 0.2) (Absi *et al.*, 2013; Almeder *et al.*, 2015; Brahimi *et al.*, 2006; Bushuev *et al.*, 2015; Glock, Grosse et Ries, 2014; Lee, Kang et Lai, 2011; Yalaoui *et al.*, 2012). Le dimensionnement des lots devient un sujet de grand intérêt dans le contexte de la GCAI (Almeder *et al.*, 2015). Cet intérêt est dû à l'importance de l'optimisation du transport et la gestion des stocks pour les entreprises industrielles et commerciales (Glock, Grosse et Ries, 2014). En outre, le problème de gestion des stocks est de plus en plus difficile à résoudre en raison de la complexité de

l'environnement manufacturier et de l'augmentation de la compétitivité des économies développées (Lee, Kang et Lai, 2011).

Dans le processus de planification des livraisons de la CAI, la sélection du mode de transport est une étape nécessaire. Généralement, il existe deux principaux modes de livraison : 1) le mode de transport aérien et 2) le mode de transport maritime (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011). Le mode de transport aérien est plus cher avec moins de variabilité, mais le temps de livraison est court. Par conséquent, la demande du client peut être satisfaite dans un court délai. Le mode maritime est moins cher que le mode aérien, mais le temps de livraison est plus long (transport par bateau) et il y'a plus de variabilité. Avec le transport maritime, il existe deux méthodes pour livrer les produits. La première méthode consiste à utiliser un conteneur complet pour une seule commande : *Full Container Load*. La deuxième méthode consiste à utiliser une partie seulement du conteneur pour la commande : *Less than Container Load*. Généralement pour les quantités importantes de produits, les fournisseurs et les clients utilisent le *Full Container Load* et chaque client est livré séparément ainsi la collaboration entre les clients est absente.

Le client préfère être livré séparément pour des raisons de confidentialité. Il évite de partager ses informations concernant le type de produits, les quantités à livrer et les capacités pour ne pas donner de l'information à la concurrence. Par contre, il paye pour un volume ou un poids supplémentaire non utilisé. Pour éviter cette perte en poids et en volume, la collaboration permet l'utilisation optimale des caractéristiques des conteneurs. Cela dit, le client doit accepter de partager ces informations et établir un contrat de confiance avec des partenaires de la chaîne.

La collaboration dans la chaîne d'approvisionnement est définie par Brandenburg *et al.* (2014) comme étant une relation, sur le long terme entre les membres du réseau, caractérisée par la réduction des coûts de transaction et l'augmentation du partage des ressources. Elle est définie aussi par Becker *et al.* (2011) comme étant une coopération commerciale entre quelques entreprises juridiquement et économiquement indépendantes pour accroître la

compétitivité commune. La collaboration entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement permet d'atteindre les attentes des consommateurs. Elle améliore la productivité, amène plus de flexibilité et minimise les coûts. De plus, elle génère des synergies comme la mise en commun des ressources, le partage du savoir-faire et de certaines forces et capacités et l'obtention d'une gouvernance efficace. Et surtout, elle permet d'atteindre la stabilité et la durabilité des chaînes d'approvisionnement (Becker *et al.*, 2011).

Deux classes de méthode de collaboration peuvent être distinguées au niveau du réseau logistique : 1) la collaboration horizontale et 2) la collaboration verticale (Figure 0.2). La collaboration horizontale est définie comme un accord commercial entre deux compagnies ou plus du même niveau du réseau dans le but de travailler ensemble pour atteindre un objectif commun (Bahinipati, Kanda et Deshmukh, 2009). La collaboration verticale est définie comme un accord commercial entre deux compagnies ou plus de différents niveaux du réseau dans le but de travailler ensemble afin de tirer avantage de la coopération (Becker *et al.*, 2011).

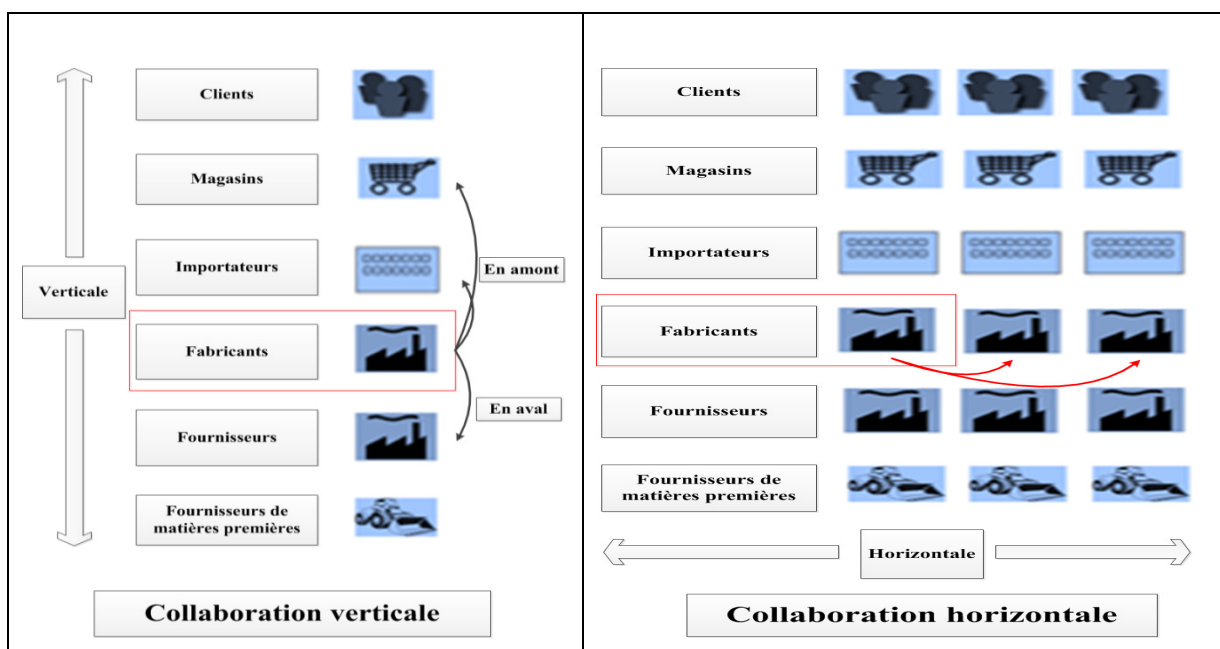


Figure 0.2 Collaboration verticale versus collaboration horizontale

La collaboration au niveau du transport (collaboration horizontale) est une autre façon de pousser les acteurs du réseau de la chaîne d'approvisionnement à travailler ensemble afin d'améliorer l'efficacité du processus de transport. Pour améliorer la performance de la planification du transport et son processus d'exécution, toutes les parties impliquées dans l'accord doivent partager des informations importantes sur la demande, les livraisons et la capacité (CTM, 2004). Cette condition rend difficile l'implémentation du transport collaboratif dans le réseau à cause du manque de confiance entre les partenaires commerciaux (Bahinipati, Kanda et Deshmukh, 2009). Cela dit, beaucoup d'entreprises adoptent de nouvelles pratiques dans leur gestion de la chaîne d'approvisionnement afin de réduire les investissements sur les stocks et le temps du cycle de la demande ce qui induit plus de pression pour tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement (CTM, 2004). Ainsi, il est devenu important, surtout pour les petites et moyennes entreprises (PME), de collaborer dans tous les processus de la chaîne d'approvisionnement et particulièrement au niveau du transport.

Le développement durable est aussi un facteur important à considérer dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Plusieurs secteurs font face aujourd'hui à des pressions pour améliorer leur durabilité au niveau environnemental et social. Même si une définition universelle de la logistique et chaîne d'approvisionnement durable n'existe pas, Seuring et Müller (2008) définissent la gestion de la chaîne d'approvisionnement durable comme étant « *la gestion du matériel, l'information et le flux du capital aussi bien que la coopération entre les entreprises à travers la chaîne d'approvisionnement pour atteindre les objectifs des trois dimensions de la durabilité, c.-à-d., économique, environnementale et sociale, qui dérivent des exigences des clients et des intervenants* ». L'aspect économique a été intégré dans plusieurs travaux de recherche. Cependant, l'aspect social reste encore à développer surtout qu'il est parfois difficile à quantifier.

Le volet environnemental est devenu plus commun dans la recherche sur la gestion de la CAI (Benjaafar, Li et Daskin, 2013; Brandenburg *et al.*, 2014; Fahimnia *et al.*, 2014a; Fahimnia *et*

al., 2014b; Godichaud et Amodeo, 2015). Ceci a commencé par la volonté de certaines entreprises d'améliorer leur image en diminuant leur empreinte environnementale (Alharbi, Wang et Davy, 2014). Mais cette initiative est devenue une obligation dans certains pays où le gouvernement impose une réglementation spécifique à chaque domaine d'activité. Le concept a pris de l'ampleur jusqu'au niveau international avec le protocole de Kyoto qui exige que tous les pays participants doivent afficher leur niveau d'émissions de gaz à effet de serre (GHG) (Chaabane, Ramudhin et Paquet, 2012). Malheureusement, certains pays n'ont pas pu respecter l'accord et ont quitté le protocole de Kyoto comme les États-Unis et le Canada. Par contre, de nouvelles alliances ont vu le jour, comme l'alliance entre le Québec et la Californie, le 13 décembre 2012. Cette alliance permet l'harmonisation du système de plafonnement et d'échange (SPEDE) québécois avec celui de la Californie et émettant par décret les limites de plafonnement d'émissions de GES de la province jusqu'en 2020 (Dumont, 2013). Le 1er janvier 2013, le Québec a mis en place le marché du carbone de la *Western Climate Initiative* (WCI) et c'est ainsi qu'a commencé la première période de conformité du système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE) et donc toutes les entreprises visées par ce système doivent prendre en compte un coût carbone dans leur processus de prise de décision. Mais récemment, un nouveau concept est apparu intitulé l'internet physique. Ce concept apporte une nouvelle vision de la durabilité en affirmant que la façon de transporter, manipuler, entreposer, fabriquer, approvisionner et utiliser les objets physiques à travers le monde n'est pas durable économiquement, écologiquement et socialement (Montreuil, 2011).

Dans le domaine du transport international, plusieurs travaux de recherche ont été effectués concernant l'aspect environnemental (Alharbi, Wang et Davy, 2014; Cadarso *et al.*, 2010; Cristea *et al.*, 2013; Pruzan-Jorgensen, 2010). Le transport international représente une source non négligeable de pollution d'air, particulièrement des émissions de gaz à effet de serre (GHG). Il impacte progressivement sur l'environnement et les changements climatiques, et son impact augmente avec l'évolution du commerce international et la fragmentation des processus de production suite à la création des chaînes d'approvisionnement internationales (Cadarso *et al.*, 2010). Il est responsable de 33 % des

émissions dues au transport des marchandises entre les différents partenaires internationaux au niveau du commerce international. De plus, les émissions de CO₂ dues au transport international maritime et aérien ont augmenté de 72.9 % entre 1990 et 2006. En revanche, les émissions associées au transport international sont négligées, d'une part, dans les accords internationaux comme le protocole de Kyoto et d'une autre part, dans les efforts consacrés à la collecte de données. De ce fait, l'estimation réelle des émissions de gaz à effet de serre au niveau international n'est pas exacte (Cristea *et al.*, 2013).

Dans ce travail, nous proposons d'étudier l'impact de la combinaison de la collaboration horizontale et verticale au niveau du transport pour optimiser la chaîne d'approvisionnement dans le contexte de logistique internationale. L'objectif est d'une part de déterminer la quantité des produits finis à livrer par chaque mode de transport pour satisfaire la demande du client final avec un coût total minimum. D'autre part, le but est d'analyser l'impact du transport collaboratif entre les clients et les fournisseurs dans le réseau de la CAI. Les clients peuvent collaborer par le partage des différentes ressources comme les conteneurs. Les clients et les fournisseurs peuvent collaborer par la synchronisation des commandes et des livraisons.

Le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale compte diverses problématiques à tous les niveaux de la chaîne logistique. Le transport constitue une partie non négligeable de la chaîne d'approvisionnement car il coûte du temps et de l'argent et a un impact direct sur la satisfaction de la demande du client. Plus particulièrement, dans la chaîne d'approvisionnement internationale, le transport est encore plus important car il représente la partie cruciale de l'approvisionnement avec toutes les contraintes de délais de livraison, les frais de douane et la synchronisation nécessaire entre les acteurs du réseau.

Dans le transport international, plusieurs éléments sont pris en compte dont le choix du mode de transport. Il existe deux modes de transport international généralement utilisés : 1) le mode aérien et 2) le mode maritime. Chaque mode de livraison est caractérisé par un délai de

livraison à considérer. Dans le mode de transport maritime, il existe deux types de livraison, le *Full Container Load* et le *Less than Container Load*. Chacun des modes de livraison a une capacité et un coût spécifiques. Il est donc important, afin de satisfaire la demande du client, de déterminer la quantité de chaque produit à livrer à chaque période et par chaque mode de livraison en considérant les taxes et les droits de douane.

Il est aussi important, dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale de déterminer la taille des lots à commander dans le cas où le client exprime un besoin global à satisfaire sur une période de temps déterminée. Il est donc nécessaire de déterminer à chaque période la taille du lot que le client doit commander en respectant la contrainte de la demande minimale afin d'analyser la variation des stocks au niveau du client.

Dans le domaine du transport international, les entreprises cherchent à mettre en place de nouvelles approches pour minimiser leurs coûts totaux et leurs empreintes environnementales. Une des approches utilisées est la collaboration entre les acteurs de la chaîne d'approvisionnement. De là, découle la principale problématique de recherche exprimée par la question principale de recherche : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale et verticale sur l'optimisation du transport de la chaîne d'approvisionnement internationale* » ?

Cette problématique de recherche est constituée de deux parties principales. La première partie concerne l'impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la gestion de la CAI. La deuxième partie représente l'impact de la combinaison de la collaboration horizontale et verticale sur la gestion de la CAI. Ces deux parties sont exprimées par les deux questions de recherche suivantes :

- 1- La première question de recherche qui en découle est : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale entre les clients du réseau sur la gestion de la chaîne*

d'approvisionnement internationale » ? La collaboration dans ce cas est exprimée par le partage d'une ressource entre les clients du réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale. Cette ressource est le conteneur. Il est supposé que les clients acceptent de collaborer entre eux et de partager des informations relatives à leurs livraisons. Ainsi, ces informations peuvent être utilisées pour planifier la consolidation des livraisons dans un même conteneur afin de minimiser les coûts, l'impact environnemental et améliorer l'aspect social des employés de la chaîne. Cela dit, dans cette partie, chaque client planifie sa demande indépendamment du fournisseur. La commande est, dans ce cas, égale à la consommation du client. Le fournisseur et le client ne communiquent pas entre eux.

- 2- La deuxième question de recherche qui en découle est : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs sur la gestion de la CAI* » ? Le premier objectif de la gestion de la chaîne d'approvisionnement est la satisfaction du client. Ceci veut dire concrètement de livrer les commandes du client sans retard. Il faut prendre en considération les délais de livraison. Le deuxième objectif est de minimiser le coût total. Pour cela, il faut considérer tous les coûts liés à l'approvisionnement et travailler à les minimiser tout en respectant les délais de livraison. Pour satisfaire le besoin global du client sur un horizon de temps défini, il est important de déterminer la taille du lot à commander à chaque période de temps. Pour ce faire, le client doit communiquer ces informations au fournisseur pour travailler ensemble à synchroniser la planification des commandes et des livraisons. Dans ce cas, la consommation du client est différente de la commande. La collaboration entre le client et le fournisseur permet d'analyser la variation des stocks à travers l'horizon de planification et de livrer toute la commande du client en respectant les contraintes de la demande minimale et les délais de livraison.

Ainsi, les objectifs de recherche de ce travail sont :

- 1- Premièrement, nous proposons une configuration du réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale caractérisée par plusieurs fournisseurs, plusieurs clients, et plusieurs produits avec le choix du mode de transport. À chaque période de temps, nous déterminons la quantité de produits à livrer du fournisseur au client par chaque mode de transport. De plus, toutes les taxes et les droits de douane pour le transport international sont inclus dans la fonction coût.
- 2- Deuxièmement, nous proposons un modèle linéaire en nombres mixtes (MILP) d'optimisation pour analyser l'impact de la collaboration entre les clients sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Nous déterminons à quel point les livraisons des clients peuvent être consolidées en combinant les produits selon le poids et le volume. Ceci, afin d'exploiter toute la capacité des conteneurs durant la phase de transport et de minimiser ou éliminer le fait que les conteneurs voyage à moitié vide.
- 3- Finalement, nous proposons un modèle linéaire en nombre mixte (MILP) d'optimisation pour analyser l'impact de la collaboration entre les clients et les fournisseurs sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Nous nous focalisons sur l'effet du dimensionnement des lots sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale afin de synchroniser les commandes et les livraisons.

Ce document est présenté en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, une revue de la littérature sur les chaînes d'approvisionnement internationales, sur les problèmes de planification des livraisons, sur les problèmes de dimensionnement des lots, sur la gestion du transport collaboratif, sur la collaboration horizontale et la collaboration verticale est présentée. Le deuxième chapitre explique la méthodologie de recherche utilisée afin de résoudre la problématique de recherche. Dans le troisième chapitre, l'effet de la collaboration

horizontale entre les clients sur la CAI est traité en proposant un modèle mathématique linéaire en nombres mixtes et en présentant les résultats obtenus de l'étude de cas traitée et de l'analyse de sensibilité. Dans le quatrième chapitre, l'effet de la collaboration horizontale et verticale entre les acteurs de la CAI est traité en considérant un modèle mathématique et en présentant une étude de cas avec une analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle. Une conclusion qui résume l'ensemble des résultats obtenus et les pistes de recherche proposées pour des travaux futurs est présentée à la fin du document.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Chaîne d'approvisionnement internationale

1.1.1 Introduction

De nos jours, la modélisation des chaînes d'approvisionnement est devenue un critère concurrentiel entre les entreprises. On ne parle plus d'entreprise vs entreprise, mais de chaîne logistique vs chaîne logistique. Les succès des chaînes d'approvisionnement de Wal-Mart et de Dell démontrent l'énorme avantage concurrentiel que les chaînes d'approvisionnement bien conçues et bien gérées peuvent donner à une société (Bassett et Gardner, 2013).

La gestion d'une chaîne d'approvisionnement internationale est un problème complexe, mais qui prend de l'ampleur dans le domaine de la recherche suite à l'intérêt des cadres à avoir un outil d'aide à la décision pour avoir des résultats immédiats en ce qui concerne la gestion des flux de matière et d'information. Au niveau de la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale, les entreprises font face à plusieurs défis (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007) dont :

- 1- Fourniture d'une proposition de valeur unique aux clients à travers le monde.
- 2- Intensification de la concurrence du monde entier.
- 3- Adaptation aux contextes nationaux multiples avec des cultures, systèmes politiques et économiques, pratiques commerciales, systèmes fiscaux et juridiques différents.
- 4- Disponibilité et niveau d'infrastructure des transports et des télécommunications.
- 5- Complexité de la gestion d'un réseau étendu de fournisseurs, usines de production, intermédiaires et clients dans la chaîne d'approvisionnement.
- 6- Impact de la géographie : le temps, la distance et l'emplacement des marchés.
- 7- Répondre à l'évolution des taux de change monétaires en déplaçant la production vers des sites à moindre coût, avec les changements qui en résultent dans les configurations de réseau et des itinéraires.

Pour aider les entreprises à faire face aux défis cités ci-dessus, les chercheurs travaillent à développer des modèles et des outils d'aide à la décision pour la gestion des chaînes d'approvisionnement internationales. Ceci est rendu possible grâce à trois éléments essentiels (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007) : 1) les changements dans la politique économique mondiale et les révolutions technologiques dans 2) les transports et 3) les télécommunications. La tendance à la baisse des tarifs et la suppression des barrières non tarifaires ainsi que le développement des communautés commerciales régionales, comme l'Union européenne et l'ASEAN, encouragent le commerce et les investissements internationaux.

Le développement du fret aérien, du transport automobile et du transport maritime de conteneurs étend la portée du système à de nouveaux domaines et rend le mouvement physique des marchandises plus facile et moins cher que jamais. De plus, les technologies de l'information et des télécommunications, y compris les systèmes ERP, la documentation électronique, et les systèmes de suivi, permettent de coordonner les opérations à travers le monde (Bassett et Gardner, 2013).

La complexité de la chaîne d'approvisionnement internationale est due aux facteurs qui l'entourent et qui participent explicitement ou implicitement à son évolution. Les facteurs les plus indicatifs sont les questions politiques et culturelles, les technologies de l'information et de la communication, les systèmes juridiques et les marchés du travail. Les questions politiques se constituent de trois-points : protectionnisme, libéralisation du commerce par l'organisation mondiale du commerce, développement du commerce régional et son unification.

Les économies émergentes ont souvent recours à un protectionnisme à travers des barrières tarifaires élevées et des contrôles directs pour limiter la concurrence interne et encourager une technologie basée localement. Ils peuvent également chercher à attirer l'industrie par des subventions directes et des mécanismes de financement spéciaux. L'organisation mondiale du commerce (OMC) est un accord entre les pays pour libéraliser le commerce et

l'investissement. L'OMC offre potentiellement une base pour éliminer la discrimination et d'autres obstacles rencontrés par le commerce. Cet accord a remplacé l'accord général sur les tarifs douaniers et du commerce qui a permis de pratiquer le commerce mondial dans les années suivant la deuxième guerre mondiale. Les pays qui font partie de l'accord doivent accepter de poursuivre la baisse des tarifs, un écoulement libre du capital et l'application des droits de propriété intellectuelle. Un autre point important est la pression des taux de change qui oblige les chaînes d'approvisionnement à répondre aux incitations économiques de subvention et de protection tarifaire. Les taux de change sont d'une importance majeure car ils changent les relations financières des pays et régions et donc, changent les mouvements des produits physiques.

Plusieurs regroupements ont vu le jour, dont le but de développer le commerce régional. Par exemple l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) qui est un arrangement entre le Canada, le Mexique et les États-Unis pour développer le libre-échange et l'industrie dans la zone combinée. L'ALENA implique des réductions tarifaires et la facilité de circulation des marchandises et des capitaux à travers les frontières.

Les questions culturelles s'intéressent généralement à la protection des droits de l'homme afin d'éviter les abus aux pratiques de travail, y compris la négociation collective, à l'élimination du travail forcé, à l'abolition du travail des enfants et l'élimination de la discrimination, à l'appui de l'environnement pour des mesures de précaution en prenant la responsabilité environnementale et en soutenant le développement et la diffusion de technologies respectueuses de l'environnement (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007).

Les cultures influencent les chaînes d'approvisionnement de plusieurs façons : les institutions, les organisations, la collecte de données et d'interprétation, les pratiques contractuelles, les niveaux d'enseignement, les attitudes à l'égard du travail et les pratiques de travail. La partie recherche et développement a été favorisée par l'éducation, comme un aimant pour les investissements par des industries particulières. Les universités et les instituts locaux deviennent une base pour l'innovation. Dans la pratique de gestion, plusieurs

dimensions influent sur le comportement organisationnel international : la langue, le contexte, l'orientation des tâches et le temps, la puissance et le flux d'information. Ensemble, ils définissent la culture de gestion.

La technologie de l'information (TI) joue un rôle crucial dans la coordination opérationnelle. Elle requiert des données standard et les pratiques d'exploitation, exigeant l'uniformité des pratiques de gestion. Au-delà de la problématique générale des systèmes d'information de la chaîne d'approvisionnement, il existe des problèmes spécifiques liés au passage de frontières nationales. Le système global comprend des réseaux, des liens de communication et des logiciels. Les zones à problèmes se concentrent sur le contrôle gouvernemental, la capacité d'accéder au système, le taux et l'étendue de l'adoption de la technologie, la nature et le volume de données et la coordination de temps (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007).

Définitions de la chaîne d'approvisionnement

Il existe dans la littérature plusieurs définitions de la chaîne d'approvisionnement. Nous pouvons la définir comme étant une séquence linéaire d'opérations organisées autour du flux des matières depuis la source d'approvisionnement jusqu'à la distribution finale des produits finis pour les utilisateurs finaux. En général, ceci inclut les sources des ressources matérielles, et l'organisation des transformateurs, distributeurs et utilisateurs. Il s'agit aussi de soutenir les entreprises à fournir le transport, la communication et d'autres fonctions spécialisées. Ensemble, ils deviennent une seule entité coordonnée qui transcende les frontières organisationnelles (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007).

Il est important aussi de prendre en compte l'impact de la chaîne d'approvisionnement sur l'économie, l'environnement et la société, autrement dit, la durabilité de la chaîne d'approvisionnement. Skjøtt-Larsen *et al.* (2007) définissent la chaîne d'approvisionnement durable comme étant la collaboration entre les membres de la chaîne d'approvisionnement dans toutes les activités qui sont reliées à la délivrance d'un produit ou à la prestation de service écologiquement et socialement responsable au client final, ainsi que l'obtention

d'information et de profits acceptables dans la chaîne d'approvisionnement. Morali et Searcy (2013) reprennent une panoplie de définitions de la gestion de la chaîne d'approvisionnement durable de différents travaux dont Seuring et Müller (2008) qui définissent la gestion de la chaîne d'approvisionnement durable comme étant la gestion du matériel, l'information et les flux de capitaux ainsi que la coopération entre les entreprises de la chaîne d'approvisionnement, tout en tenant en compte les objectifs des trois dimensions du développement durable, c'est-à-dire, économique, environnemental et social, qui sont dérivés des exigences des clients et des intervenants.

Chaîne d'approvisionnement locale vs chaîne d'approvisionnement international

Les différences entre la chaîne d'approvisionnement internationale et la chaîne d'approvisionnement locale se présentent en deux points principaux : environnement et structure plus complexes. Le premier point qui est la complexité de l'environnement comprend une variété importante de dimensions, de différences politiques et les risques de change, de différences culturelles et géographiques, de variations dans les systèmes juridiques et les infrastructures. Le deuxième point, qui est la complexité structurelle, prend en compte le nombre d'entreprises distinctes, les fonctions, les formes d'organisation, la variété des marchés et des produits que l'entreprise doit gérer et contrôler.

En allant plus en détails, nous remarquons que différents facteurs sont pris en compte. Le plus important est le client. La chaîne d'approvisionnement mondiale doit répondre autant que possible aux exigences spécifiques du marché du pays grâce à des produits et services adaptés aux besoins de chaque client. De plus, face à la concurrence, elle doit rechercher les sources les plus efficaces d'approvisionnement. Cette recherche d'efficacité entre souvent en conflit avec les préférences des clients correspondants. Aussi, la chaîne d'approvisionnement doit s'adapter simultanément à de multiples contraintes imposées par l'environnement dans lequel elle opère et qui ne cessent de changer rapidement avec l'économie mondiale. Enfin, la contrainte immuable de la distance et le temps de transit affectent la réponse dynamique de la chaîne d'approvisionnement comme un système. La tâche de gestion est immense, car il est

question de coordonner un système complexe lorsque l'envergure conteste la capacité à contrôler (Skjøtt-Larsen *et al.*, 2007).

Dans la section suivante, une étude des travaux récents de la littérature permet d'identifier les limites des travaux actuelles et les développements nécessaires pour répondre aux questions soulevées dans le chapitre précédent.

1.1.2 Chaîne d'approvisionnement internationale

Durant ces dernières années, la recherche dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement internationale durable ne cesse d'augmenter (Benjaafar, Li et Daskin, 2013; Brandenburg *et al.*, 2014; Fahimnia *et al.*, 2014a; Fahimnia *et al.*, 2014b; Godichaud et Amodeo, 2015). D'après le travail de Seuring et Müller (2008), la plus grande partie des travaux réalisés sur la chaîne d'approvisionnement durable utilise la théorie, les études de cas et les enquêtes comme méthodologie de recherche (Chien et Shih, 2007; Neilson et Pritchard, 2007). Il existe une partie des chercheurs qui appliquent la modélisation mathématique.

La littérature sur la CAI durable se focalise sur l'aspect environnemental de la durabilité, car l'aspect social est encore difficile à quantifier (Brandenburg *et al.*, 2014; Seuring et Müller, 2008). Dans leur travail, Fahimnia *et al.* (2014b) proposent un modèle d'optimisation mathématique qui incorpore des objectifs économiques et environnementaux exprimés par les émissions de carbone. Ils déterminent, selon différents scénarios de prix carbone et prix fioul, les compromis économiques et environnementaux. Plus précisément, ils examinent les impacts possibles que peut avoir le prix carbone sur les décisions tactiques de la chaîne d'approvisionnement et la relation entre le mécanisme du prix du carbone et le prix du fioul. Dans le même contexte, Fahimnia *et al.* (2014a) ont développé un modèle de planification tactique de chaîne d'approvisionnement qui intègre des objectifs économiques et environnementaux exprimés par les émissions de carbone sous le régime de la politique fiscale du carbone. Ils ont déduit des informations organisationnelles et politiques importantes sur l'impact financier et la réduction des émissions sur la taxe du carbone,

l'utilisation de l'analyse des coûts et des compromis sur les émissions pour prendre des décisions informées sur l'investissement et la façon de taxer le carbone pour un retour environnemental maximum dans le coût total de la chaîne d'approvisionnement.

Dans leur travail, Benjaafar, Li et Daskin (2013) ont aussi proposé des modèles mathématiques d'optimisation qui expliquent comment rajouter l'empreinte du carbone dans les modèles optionnels. Ils se sont focalisés sur les décisions relatives à la production et l'approvisionnement et ils ont déduit qu'une réelle opportunité existe pour influencer la collaboration à travers la chaîne d'approvisionnement pour mitiger le coût de réduction des émissions et prouver l'importance de cette collaboration. De plus, Brandenburg *et al.* (2014) ont conclu dans leur revue de littérature qu'il existe un manque dans la recherche sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement au niveau fonctionnel, car la plupart des articles se concentrent sur la production ou bien la gestion générale de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi, ils recommandent de se concentrer sur le transport et l'entreposage durables.

Cela dit, avec l'apparition de l'internet physique, la durabilité est vue différemment. D'après Montreuil (2011), la façon dont les objets physiques sont transportés, fabriqués, stockés, délivrés, entretenus, et utilisés à travers le monde n'est pas durable économiquement, écologiquement et socialement. L'auteur dresse les implications et les besoins pour l'implémentation de la vision de l'internet physique et il encourage la recherche, l'innovation et le développement de cas réels et d'applications pour donner vie au concept de l'internet physique.

1.1.3 Problèmes de planification des livraisons dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement

Dans la littérature, il existe plusieurs travaux de recherche qui traitent du problème de planification dans la chaîne d'approvisionnement. En se basant sur la revue de Kallrath (2002), les problèmes de planification se divisent en trois groupes principaux. Le premier groupe comprend les problèmes multi-sites qui peuvent être des sites de production, sites d'entreposage et points de demande. Le deuxième groupe contient les problèmes de

planification de production comme la production par lots, ou bien vendre, acheter, ouvrir, ou fermer des sites spécifiques de production (Shah et Ierapetritou, 2012; Verderame et Floudas, 2009). Le dernier et plus important groupe pour ce travail inclut les problèmes de planification de transport et logistique. Généralement, la recherche antérieure traite les problèmes de modélisation des quantités transportées et des livraisons. Plusieurs facteurs sont pris en compte comme les coûts de pénalité dus au retard de livraison, le coût de perte d'une commande quand la commande n'est pas livrée et le choix du mode de livraison (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011; Li, Bookbinder et Elhedhli, 2012).

Les méthodes de modélisation utilisées pour résoudre les problèmes de planification dans la chaîne d'approvisionnement sont généralement analytiques. La modélisation linéaire en nombres mixtes (MILP) est la plus utilisée (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011; Kallrath, 2002; Li, Bookbinder et Elhedhli, 2012; Verderame et Floudas, 2009). La modélisation stochastique en nombres mixtes (SMILP) est aussi utilisée (Chengxuan, Ang et Hengqing, 2005). L'objectif principal est de minimiser les coûts ou de maximiser le profit. Pour résoudre les problèmes de planification, deux méthodes de résolution sont utilisées : 1) la résolution exacte et 2) la résolution approchée. La méthode de résolution exacte consiste à trouver une solution optimale exacte. Les chercheurs utilisent généralement des outils d'optimisation comme *CPLEX* (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011; Li, Bookbinder et Elhedhli, 2012; Yan, Chen et Lin, 2009). La méthode de résolution approximative consiste à trouver une solution qui n'est pas nécessairement optimale. Les chercheurs utilisent généralement les heuristiques et les métaheuristiques (Chengxuan, Ang et Hengqing, 2005; Eskigun *et al.*, 2005; Sanchez, Amodeo et Prins, 2010). Ainsi, la revue de littérature s'est focalisée sur les problèmes de planification de production dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement.

Les problèmes de planification des livraisons ne sont pas considérés dans la littérature malgré leur importance dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement en général et de la chaîne d'approvisionnement internationale en particulier. Bhatnagar, Mehta et Chong Teo (2011) proposent un modèle mathématique linéaire en nombre mixte (MILP) pour coordonner les

décisions agrégées de planification et les décisions d'ordonnancement sur le court terme dans la chaîne d'approvisionnement internationale avec deux modes de transport. Ils déterminent les quantités à livrer par le mode de transport aérien et le mode transport maritime et le niveau des stocks pour un seul client. Le mode de livraison aérien est utilisé pour éviter les ruptures de stock. Ils ne considèrent pas les taxes et les droits de douane appliqués sur les produits au niveau de la douane. Ils se focalisent seulement sur l'aspect économique.

1.1.4 Problème de dimensionnement des lots dans la chaîne d'approvisionnement internationale

Durant ces dernières années, l'étude des problèmes de dimensionnement des lots est en croissance (Absi *et al.*, 2013; Almeder *et al.*, 2015; Brahimi *et al.*, 2006; Bushuev *et al.*, 2015; Glock, Grosse et Ries, 2014; Lee, Kang et Lai, 2011; Yalaoui *et al.*, 2012). Selon Almeder *et al.* (2015), il est possible d'avoir des résultats plus réalistes et d'accroître les économies de coûts en développant deux modèles de dimensionnement de lot et d'ordonnancement. Les chercheurs ont également synchronisé les lots de produits dans la formulation multiniveaux du problème de lotissement et d'ordonnancement. Bushuev *et al.* (2015) ont proposé une revue des modèles de dimensionnement des lots. Afin de garder les chercheurs au courant des nouvelles recherches sur le dimensionnement des lots, cette revue fournit une consolidation des travaux de recherche sur la gestion des stocks. Les chercheurs ont identifié des lacunes qui peuvent être des pistes pour de nouveaux domaines de recherche à explorer dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement durable.

De plus, Glock, Grosse et Ries (2014) présente une étude qui regroupe tous les travaux de dimensionnement de lot du modèle de Harris qui ont été faits ces dernières années. Les chercheurs peuvent utiliser cette étude pour positionner leurs travaux par rapport à la littérature, trouver le développement de différents problèmes de dimensionnement de lots et pour être inspiré par les pistes de recherche proposées dans l'étude. En outre, un modèle de programmation mixte en nombres entiers (MIP) est présenté pour formuler le problème de dimensionnement des lot et un algorithme génétique (GA) est proposé pour résoudre les problèmes de dimensionnement des lots à grande échelle. L'objectif est de minimiser les

coûts totaux qui comprennent la commande, détention, l'achat et les frais de transport, et les ruptures de stock ne sont pas autorisées. Ainsi, le modèle MIP est utilisé pour trouver la solution optimale pour des problèmes moins complexes et le modèle GA est utilisé pour déterminer une solution quasi optimale pour des problèmes plus compliqués (Lee, Kang et Lai, 2011).

De plus, un état de l'art des problèmes de dimensionnement des lots à un seul produit (SILSP) a été fait (Brahimi *et al.*, 2006). Les deux versions des problèmes à capacité finie et infinie ont été considérées. Plusieurs méthodes de résolution pour les problèmes à capacité infinie (SILSP) sont présentées avec quatre formulations mathématiques du problème classique. Cependant, Absi *et al.* (2013) ont considéré l'aspect environnemental dans leur problème. Ils ont introduit certaines contraintes pour limiter les émissions de carbone par unité de produit fourni avec plusieurs modes de problème de lotissement. Chaque mode est caractérisé par les émissions de carbone et des coûts économiques unitaires. Ils ont analysé quatre types de contraintes dans le problème de dimensionnement des lots pour un seul produit.

La gestion de chaîne d'approvisionnement internationale reconnaît délibérément la nécessité d'approvisionner les marchés nationaux, souvent en utilisant des producteurs ou entrepreneurs à l'étranger. La CAI est plus complexe à gérer, face à un ensemble diversifié de conditions environnementales.

Dans ce chapitre, nous présentons une revue de la littérature concernant la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale durable, les problèmes de planification des livraisons et de dimensionnement des lots. De cette revue de littérature, nous déduisons que :

- 1- Le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale durable reste riche en problématiques à tous les niveaux de la chaîne. Plus spécifiquement, les travaux de recherches précédents ne se sont pas focalisés sur les différents problèmes

liés au transport alors que c'est un élément clé dans la gestion des chaînes d'approvisionnement internationales.

- 2- Il existe un manque de travaux de recherche sur les problèmes de planification des livraisons dans la littérature malgré leur importance dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement en général et de la chaîne d'approvisionnement internationale en particulier.
- 3- L'application du principe de dimensionnement des lots dans le domaine du transport international est récente dotée d'un potentiel important de recherche et développement.

1.2 Collaboration horizontale et verticale dans le transport

1.2.1 Mise en contexte

Le transport est une activité vitale pour le déplacement des marchandises à travers le monde. La gestion du transport est concernée par l'achat et le contrôle global de ce service de mouvement utilisé par l'entreprise pour réaliser ses objectifs logistiques. La logistique a traditionnellement mis l'accent sur la coordination de produit, le mouvement de l'information et les activités de flux d'une entreprise. La gestion de la chaîne d'approvisionnement coordonne le produit, l'information, le mouvement de la trésorerie et les activités de flux. La gestion effective et efficiente du transport a un impact significatif sur les trois types de flux de l'entreprise (Produit, information, trésorerie). Elle est essentielle pour la réalisation et l'intégration des objectifs de la chaîne d'approvisionnement (Coyle, 2011).

Le transport est la création d'un lieu et d'un temps utilitaires. Quand les biens sont déplacés à des lieux où ils ont une plus grande valeur que celle qu'ils avaient à l'origine, ils créent une utilité. Le temps utilitaire veut dire que le service est produit lorsque cela est nécessaire. Le temps et le lieu utilitaires sont fournis aux marchandises quand elles sont déplacées de leur origine à la destination au moment demandé. Le transport est un service et non pas un

produit physique et tangible. Mais il a des caractéristiques qui rendent l'achat de ce service similaire à l'achat d'un bien. Un aspect du transport est le mouvement du service. Ceci inclut la vitesse (que ça soit du porte-à-porte ou d'un terminal à un autre terminal), la fiabilité, et la fréquence du service. Un autre facteur est l'équipement utilisé, qui est un facteur majeur pour le transport des marchandises. L'équipement affecte les préparations des livraisons, la taille de l'expédition, les coûts de chargement et de déchargement. Le troisième facteur est le coût du service de transport. Ce coût comprend une charge ou un taux cité par le transporteur ainsi que les coûts périphériques supportés par l'utilisateur. Il inclut donc les coûts de ramassage et de livraison, exigences d'emballage, dommages ou charge de détention, et des charges de service supplémentaire comme le chauffage ou la réfrigération (Coyle, 2011).

Le transport ne doit pas être vu comme un simple mouvement de marchandises à travers l'espace. L'utilisateur est actuellement en train d'acheter un ensemble de services du transporteur à un certain coût. L'ensemble des services varie selon les transporteurs et les modes de transport, avec différents prix fréquemment dus aux différents services. Le transport est aussi l'un des facteurs économiques dans la production des biens et de services. La fonction de base du transport est de fournir le marché en produits. Le transport joue un rôle majeur dans les relations géographiques et temporelles (Coyle, 2011).

Le transport international est gouverné par les mêmes principes économiques que le transport local, mais les utilisateurs, processus, procédures et les réglementations sont différentes. De nos jours, les entreprises voient le marché plus global que domestique et le transport international est utilisé pour augmenter la quantité des produits échangés entre les différents pays du monde (Coyle, 2011).

Il existe différents modes de transport. Les transports maritime et aérien sont le plus utilisés à l'international. Le mode aérien est assez récent comparé au mode maritime. Il est caractérisé par un coût élevé et un temps de livraison court. Il n'est pas utilisé souvent à cause de son coût élevé. Il est donc utilisé dans le cas où la marchandise doit arriver très vite comme pour rattraper un retard ou éviter les ruptures de stock (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011). Le

mode maritime est le mode le plus utilisé dans le transport international, car son coût est beaucoup moins élevé que le mode aérien. Par contre le temps de livraison est long, il est donc important de planifier toutes les livraisons (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011). Dans le transport maritime, il existe deux modes de livraison. Le premier mode de livraison est le *Full Container Load* pour un conteneur complètement chargé d'un seul fournisseur destiné à un seul client (Figure 3.1). Le deuxième mode de livraison est le *Less than Container Load* pour un conteneur chargé de plusieurs lots de plusieurs fournisseurs pour différents clients (Figure 3.2).

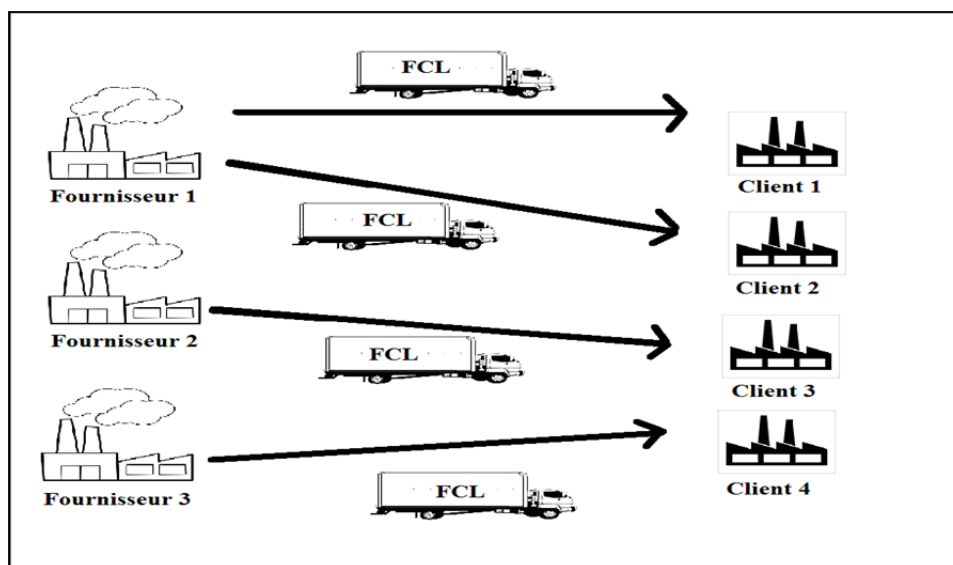


Figure 1.1 Schéma descriptif du mode de transport FCL

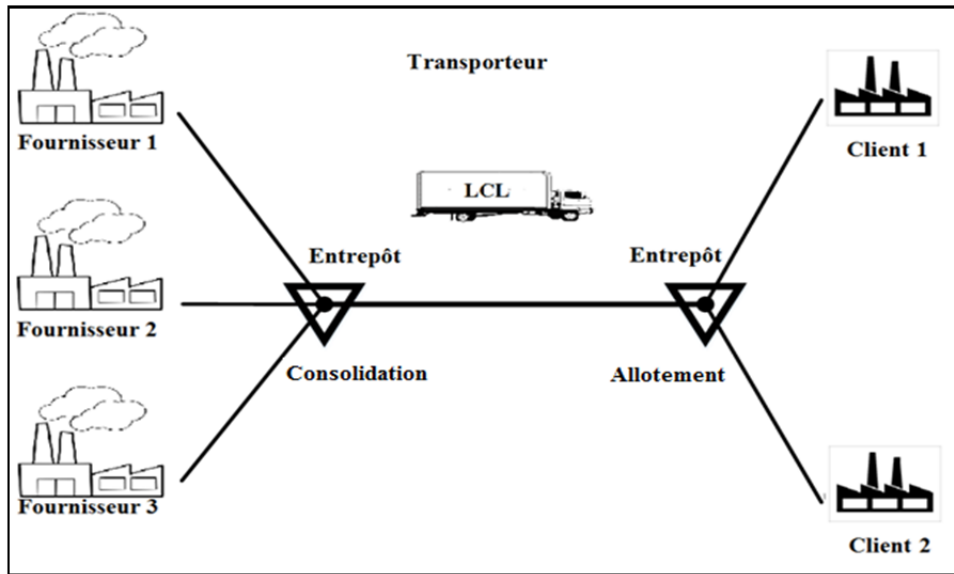


Figure 1.2 Schéma descriptif du mode de transport LCL

Gestion du transport collaboratif

La gestion du transport collaboratif (*CTM*) est un processus holistique qui rassemble les partenaires de la chaîne d'approvisionnement et les prestataires de service pour éliminer les inefficacités de la planification de transport et le processus d'exécution (CTM, 2004).

L'objectif de la gestion du transport collaboratif est d'améliorer la performance opérationnelle de toutes les parties impliquées dans la relation par l'élimination des inefficacités dans le processus de transport de la chaîne d'approvisionnement à travers la collaboration (CTM, 2004).

La gestion du transport collaboratif reconnaît deux facteurs importants (CTM, 2004) :

- 1- De plus en plus d'entreprises adoptent de nouvelles pratiques dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement pour réduire l'investissement sur les stocks et minimiser le temps de cycle des commandes, résultant d'une pression croissante sur toutes les parties impliquées dans le processus logistique. Avec un préavis aussi court, beaucoup de transporteurs ont des difficultés à synchroniser leurs actifs avec la

demande du client et par conséquent, à forcer les acheteurs des services de transport (fournisseurs, distributeurs, revendeurs,...) à payer des primes.

- 2- La satisfaction du client est une nécessité pour la réussite de toutes relations entre les parties prenantes, et l'importance de chaque contribution du transporteur est interprétée par le fait que beaucoup de mesures de performance, comme le délai de livraison et le taux de remplissage, sont directement affectées par la capacité du transporteur à ramasser, transporter et livrer les produits au bon moment. En introduisant les transporteurs dans le partenariat collaboratif et en travaillant avec eux pour réduire les coûts d'exploitation et éliminer les inefficacités, parfois causées inconsciemment par l'expéditeur ou le récepteur, tous les membres de la collaboration devront en bénéficier.

1.2.2 Collaboration horizontale

La gestion du transport collaboratif entre les acteurs de la chaîne d'approvisionnement devient un sujet de grand intérêt pour certains et un élément stratégique essentiel pour d'autres (CTM, 2004). Selon Chan et Zhang (2011), la gestion du transport collaboratif peut réduire les coûts totaux et augmenter le niveau de service des détaillants. Ceci a été le résultat d'une approche de simulation qui a été utilisée pour évaluer les bénéfices de la gestion du transport collaboratif et optimiser la capacité du délai de livraison. Il est possible aussi de déterminer le succès de l'initiative de collaboration en synthétisant l'importance du degré de prévision de la collaboration en utilisant un modèle quantitatif générique (Bahinipati, Kanda et Deshmukh, 2009).

Dans leur travail Buijs et Wortmann (2014) traitent de la collaboration horizontale de la chaîne d'approvisionnement entre les transporteurs de fret autonomes dans l'industrie de camion. Le but principal de l'étude est d'identifier et d'expliquer les défis avec la prise de décision opérationnelle conjointe dans ce contexte et d'enquêter sur le rôle précis de la technologie de l'information.

En outre, Bookbinder et Higginson (2002) ont proposé une approche basée sur des méthodes probabilistes pour étudier l'impact d'un programme de consolidation sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. De plus, Tyan, Wang et Du (2003) ont développé un modèle mathématique pour prouver que l'implémentation d'une politique de consolidation collaborative améliore le niveau de service et minimise les coûts. Wang, Kopfer et Gendreau (2014) étudient le processus de planification du transport de transitaires et analysent l'avantage d'inclure des ressources externes. En introduisant la sous-traitance, le cheminement classique de véhicules propres est étendu à une planification du transport opérationnel intégré, qui construit simultanément les plans d'accomplissement avec l'ensemble des coûts les plus bas en utilisant sa propre flotte et les véhicules de sous-traitants. Ceci est ensuite combiné avec des stratégies de planification, qui augmentent la rentabilité en échangeant des demandes entre les membres de la collaboration horizontale. Les résultats des calculs montrent des réductions de coûts considérables en utilisant l'approche de planification proposée.

Pomponi, Fracocchi et Tafuri (2015) proposent une revue de littérature synthétique sur les travaux réalisés dans le domaine de la collaboration horizontale basé sur la confiance mutuelle entre les partenaires et l'étendue de la coopération. Cette revue fournit aux chercheurs et aux industriels, un recueil, basé sur la théorie, des travaux de la collaboration horizontale dans le contexte de la logistique.

Vanovermeire *et al.* (2013) démontrent que lorsque les partenaires d'une alliance adoptent une attitude souple (ie permettre des modifications aux termes de leurs livraisons), le coût total peut être diminué. En permettant des changements de date de livraison et permettant que d'importantes commandes puissent être divisées en plusieurs livraisons, les partenaires peuvent augmenter leurs gains individuels et le gain de collaboration. De plus, Ankersmit, Rezaei et Tavasszy (2014) proposent une étude de cas sur le transport des cargos aérien sur le sol de l'aéroport de Schiphol. Cette étude révèle le potentiel de la collaboration horizontale dans le transport des cargos aériens entre plusieurs transitaires dans un même aéroport. La principale conclusion des chercheurs est que la collaboration horizontale peut améliorer les

performances de transport, en maintenant une fréquence élevée des mouvements de transport et de maintien d'un temps de passage acceptable pour les expéditions de fret aérien, et réduire en même temps les coûts de transport jusqu'à 40 %. Dans le même contexte, Juan *et al.* (2014) traitent le problème de collaboration horizontale dans le contexte du transport routier. Les chercheurs présentent la collaboration horizontale comme un moyen de réduire les coûts de routage ainsi que les coûts dus aux émissions de CO₂. Ils présentent différents exemples numériques afin de quantifier les coûts d'acheminement et d'émissions qui peuvent être atteints à travers la collaboration horizontale.

1.2.3 Collaboration verticale

La gestion du transport collaboratif est utilisée pour réduire le temps de livraison et améliorer la fiabilité de la livraison, car le transporteur devient apte à établir la collaboration entre le fabricant et le revendeur durant la phase de planification, de prévision et d'exécution du processus d'exécution de la chaîne d'approvisionnement internationale (Tyan, Wang et Du, 2003).

Dans leur travail, Bahinipati et Deshmukh (2012) développent et résolvent les modèles e-marché de la vie réelle pour des problèmes complexes acheteurs-fournisseurs d'approvisionnement en estimant les quantités à commander dans la chaîne d'approvisionnement collaboratif. Les chercheurs déduisent que le processus de collaboration verticale serait plus efficace si la longueur de l'horizon et la taille des commandes durant la planification sont considérés comme un paramètre de négociation entre l'acheteur et le fournisseur.

De plus, Álvarez-SanJaime *et al.* (2013) démontrent qu'une ligne de transport qui construit son propre terminal trouve stratégiquement rentable de continuer à acheminer une partie de sa cargaison à travers les installations portuaires ouvertes, et de conserver son terminal non exclusive. Les chercheurs concluent que, en vertu de non-exclusivité, les lignes maritimes

offrent une plus grande variété de services, le total des augmentations de fret et les tarifs d'équilibre qui en résultent sont plus élevés qu'avec un terminal dédié.

1.2.4 Collaboration horizontale et verticale

L'exploitation du pouvoir de la collaboration horizontale et verticale permet l'émergence de nouvelles solutions innovatrices pour une meilleure optimisation du transport et l'amélioration de la performance logistique (Mason, Lalwani et Boughton, 2007).

Amer et Eltawil (2014) présentent une analyse exhaustive de la littérature sur la collaboration horizontale et verticale pour générer un contexte adéquat pour les directions de recherche qui suivent. Le document fournit un cadre écosolution stratégique compte tenu de la sélection des partenaires et les décisions d'implantation des installations de collaboration afin de réduire l'empreinte carbone des chaînes d'approvisionnement.

En outre, Guajardo et Rönnqvist (2015) proposent un modèle mathématique basé sur la théorie des jeux afin de déterminer les relations de collaboration qui devraient être créées entre les joueurs de la chaîne d'approvisionnement forestière, dont le but de minimiser les coûts.

Tableau 1.1 Aperçu de la revue de littérature dans le domaine du transport collaboratif

Articles	Types de collaboration dans le transport international			Approche utilisée	Durabilité		Contexte d'application
	Horizontale	Verticale	Horizontale et verticale		Économie	Environnement	
Bookbinder et Higginson (2002)	X			Modélisation probabiliste	X		
Tyan, Wang et Du (2003)	X			Étude de cas	X		e-commerce
Mason, Lalwani et Boughton (2007)			X	Delphi	X		Industrie du transport routier de marchandises
Bahinipati, Kanda et Deshmukh (2009)	X			AHP- Logique floue	X		Industrie des semi-conducteurs
Cadarso <i>et al.</i> (2010)				Méthode d'évaluation de performance	X	X	
Chan et Zhang (2011)	X			Simulation	X		
Bahinipati et Deshmukh (2012)		X		Modélisation mathématique	X		Industrie des semi-conducteurs
Cristea <i>et al.</i> (2013)				Collecte et analyse de données	X	X	Commerce international
Vanovermeire <i>et al.</i> (2013)	X			Étude de cas	X		
Alvarez-SanJaime <i>et al.</i> (2013)		X		Méthode d'évaluation de performance	X		
Buijs et Wortmann (2014)	X			Étude de cas	X		Informatique
Amer et Eltawil (2014)			X	Revue de littérature	X	X	
Ankersmit, Rezaei et Tavasszy (2014)	X			Étude de cas	X		Service de fret au sol des aéroports
Juan <i>et al.</i> (2014)	X			Étude de cas	X	X	

Articles	Types de collaboration dans le transport international			Approche utilisée	Durabilité		Contexte d'application
	Horizontale	Verticale	Horizontale et verticale		Économie	Environnement	
Wang, Kopfer et Gendreau (2014)	X			Modélisation mathématique	X		
Bookbinder et Higginson (2002)	X			Modélisation probabiliste	X		
Guajardo et Rönnqvist (2015)			X	Théorie des jeux	X		Transport forestier
Pomponi, Fratocchi et Tafuri (2015)	X			Revue de littérature	X	X	

1.2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue de la littérature sur les problèmes de collaboration horizontale et verticale dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Nous avons déduit que les travaux de recherche effectués sur la gestion du transport collaboratif restent minimes ce qui laisse le domaine ouvert pour plus d'idées, d'innovation, et de recherche (Tableau 3.1).

La revue de littérature réalisée dans ce chapitre sur la CAI et la collaboration dans le transport nous amènent à spécifier notre contribution dans ce travail par trois points principaux :

- 1- Premièrement, nous proposons une configuration du réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale caractérisée par plusieurs fournisseurs, plusieurs clients, et plusieurs produits avec le choix du mode de transport. À chaque période de temps, nous déterminons la quantité de produits à livrer du fournisseur au client par chaque mode de transport. De plus, toutes les taxes et les droits de douane pour le transport international sont inclus dans la fonction coût.
- 2- Deuxièmement, nous proposons un modèle linéaire en nombres mixtes (MILP) d'optimisation pour analyser l'impact de la collaboration entre les clients sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Nous déterminons à quel point les livraisons des clients peuvent être consolidées en combinant les produits selon le poids et le volume. Ceci, afin d'exploiter toute la capacité des conteneurs durant la phase de transport et de minimiser ou éliminer le fait que les conteneurs voyage à moitié vide.
- 3- Finalement, nous proposons un modèle linéaire en nombres mixtes (MILP) d'optimisation pour analyser l'impact de la collaboration entre les clients et les fournisseurs sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Nous nous focalisons sur l'effet du dimensionnement des lots sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale afin de synchroniser les commandes et les livraisons.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 Introduction

La méthodologie de recherche utilisée dans ce travail est constituée de plusieurs étapes. Pour tout travail de recherche, l'étape préalable est la définition de la problématique de recherche. Pour déterminer la problématique de recherche, une étude approfondie de la revue de la littérature a été menée sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement. De cette revue, il a été déduit qu'un manque de travaux est noté dans le domaine des chaînes d'approvisionnement internationales. Une nouvelle étude de la revue de la littérature a été donc menée orientée cette fois-ci sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. De cette revue, il a été déduit qu'il y'avait un manque de travaux sur la partie transport. De là, une revue orientée sur la gestion du transport dans la chaîne d'approvisionnement internationale a été réalisée. De cette revue, trois aspects ont été retenus : la planification des livraisons en considérant deux modes de transport avec une demande par période, le dimensionnement des lots à commander pour satisfaire un besoin global et la gestion du transport collaboratif.

Ainsi, suite à une étude détaillée de la revue de la littérature, la problématique de recherche a été déterminée et qui est : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale et verticale sur l'optimisation du transport de la chaîne d'approvisionnement internationale* » ?

Cette problématique est décortiquée en deux questions de recherche :

- 1- « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale entre les clients du réseau sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale* » ?
- 2- « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs sur la gestion de la CAI* » ?

2.2 Étapes de résolution

Une fois que la problématique de recherche est bien définie, il est question de la résoudre en trois étapes principales.

Étape 1 : Modèle d'aide à la décision pour le problème de collaboration horizontale.

La première étape est de répondre à la première question de recherche : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale entre les clients du réseau sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale* » ?

Dans cette question, la collaboration horizontale entre les clients est représentée par le partage d'un même conteneur entre ces derniers. L'objectif est d'utiliser efficacement la capacité volumique et massique du conteneur en consolidant les livraisons des clients dans un seul conteneur. Autrement dit, au lieu que le fournisseur n'envoie un conteneur à moitié vide à un client et un autre conteneur à moitié vide à un autre client, il pourra envoyer un seul conteneur utilisé à 100 % en poids et en volume à ses deux clients.

Étape 2 : Modèle d'aide à la décision pour le problème de collaboration horizontale et verticale.

La deuxième étape est de répondre à la deuxième question de recherche qui est : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs sur la gestion de la CAI* » ?

Dans cette question, la collaboration verticale et horizontale entre les clients et les fournisseurs de la chaîne d'approvisionnement internationale est représentée par la synchronisation des commandes des clients avec les livraisons des fournisseurs. Pour cela, le principe du dimensionnement des lots à livrer est utilisé afin de déterminer

pour chaque période la quantité optimale de chaque produit que le client doit commander.

Étape 3 : Test et validation.

Une fois les modèles mathématiques réalisés, il faut choisir la méthode de résolution qui correspond. Les deux modèles mathématiques obtenus sont linéaires en nombres mixtes, car la fonction objectif est linéaire et les contraintes sont linéaires et les variables de décisions sont réelles positives, entières ou binaires. La méthode de résolution qui correspond au modèle *MILP* est la méthode exacte. Pour cela, plusieurs outils de résolutions existent.

Dans ce cas deux outils sont utilisés. Le logiciel *LINGO* de LINDO et le logiciel *OPL CPLEX* d'IBM. Dans un premier temps le premier modèle mathématique a été implémenté sur le logiciel d'optimisation *LINGO*, ce qui a permis d'avoir des résultats préliminaires. Une fois la validité du modèle a été vérifiée, une étude de cas a été mise en place pour tester plusieurs scénarios. La base de données de l'étude a été constituée d'une instance d'une grande dimension et le temps de résolution sur *LINGO* a été de l'ordre de jours. Il était donc nécessaire de passer sur un logiciel plus performant.

Ainsi, dans un second temps, les deux modèles mathématiques ont été implémentés sur le logiciel *OPL CPLEX* pour pouvoir analyser les différents scénarios possibles. Dans cette étape, plusieurs configurations ont été simulées et les résultats obtenus ont été analysés ce qui a permis de répondre aux deux questions de recherche précisées dans la première partie.

2.3 Conclusion

Ainsi, pour répondre à la problématique de recherche présentée dans ce travail, deux modèles d'aide à la décision ont été mis en place en se basant sur la modélisation mathématique comme méthode de modélisation et le logiciel *OPL CPLEX* de IBM comme outil de résolution (Figure 2.1).

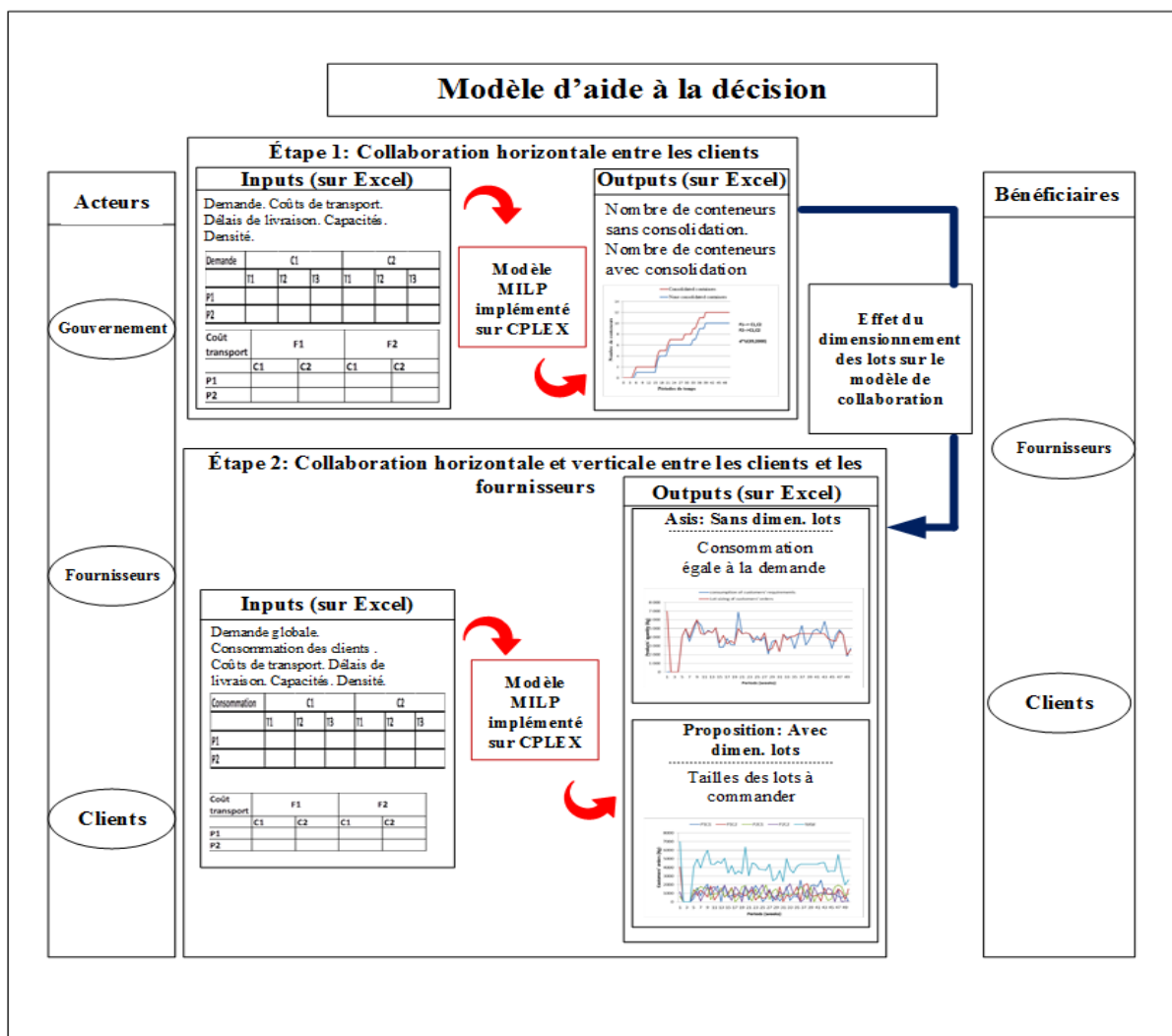


Figure 2.1 Méthodologie de recherche

CHAPITRE 3

MODÈLE DE COLLABORATION HORIZONTALE ENTRE LES CLIENTS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la configuration du réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale étudiée, le modèle mathématique linéaire en nombres mixtes réalisé pour analyser l'impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la gestion de la CAI et une étude de cas.

Dans la configuration de la collaboration horizontale, les clients sont supposés collaborer en partageant des informations sur les types de produits, les capacités et la demande. Le client planifie ces commandes indépendamment du fournisseur.

3.2 Présentation de la configuration du réseau de CAI étudié

Le modèle mathématique réalisé dans cette section permet d'analyser l'impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. L'objectif est de déterminer à travers un horizon de planification spécifique constitué de plusieurs périodes avec une demande connue, quand et combien livrer de chaque fournisseur à chaque client. Le réseau est constitué de multiples fournisseurs, multiples clients et multiples produits décrits à la Figure 3.1.

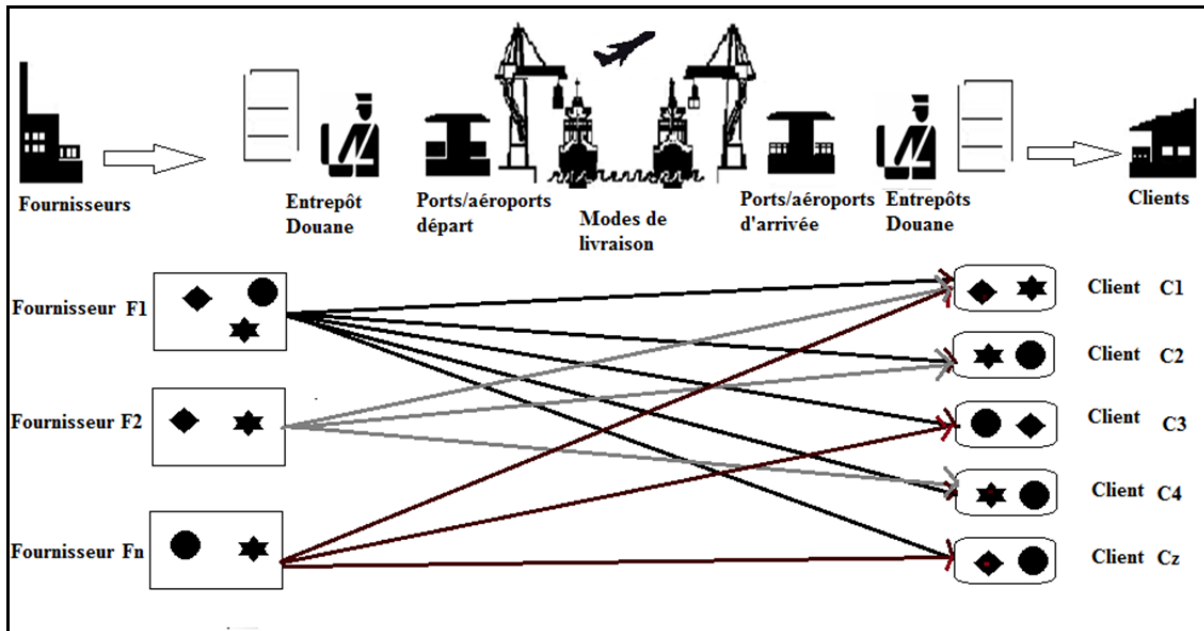


Figure 3.1 Réseau du transport dans la chaîne logistique internationale

Le client peut n'avoir qu'un seul fournisseur pour chaque produit durant tout l'horizon de planification. Il y'a aussi deux modes de livraison : le mode aérien et le mode maritime. Pour chaque période de temps, on détermine la quantité de produits à livrer par le mode de transport aérien et par le mode de transport maritime. Pour le mode maritime, il y'a deux façons de livrer. La première façon est le *Less than Container Load* utilisé pour livrer les petites quantités sous forme de palettes. La deuxième façon de livrer est le *Full container Load* (FCL) utilisé pour délivrer des quantités importantes de produits.

Mais généralement, les conteneurs voyagent à moitié vide, soit en poids soit en volume. Pour y remédier, une nouvelle configuration est proposée où les clients de la chaîne acceptent de collaborer en partageant les conteneurs. Ainsi, le fournisseur envoie un conteneur FCL à tous ses clients autant que possible, au lieu d'envoyer un conteneur pour chaque client séparément (Figure 3.2). Ceci répond à la première question de recherche : « Quel est l'impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale » ? Dans ce modèle, un seul type de conteneur est considéré, le 20 pieds décrit sur la figure 3.3.

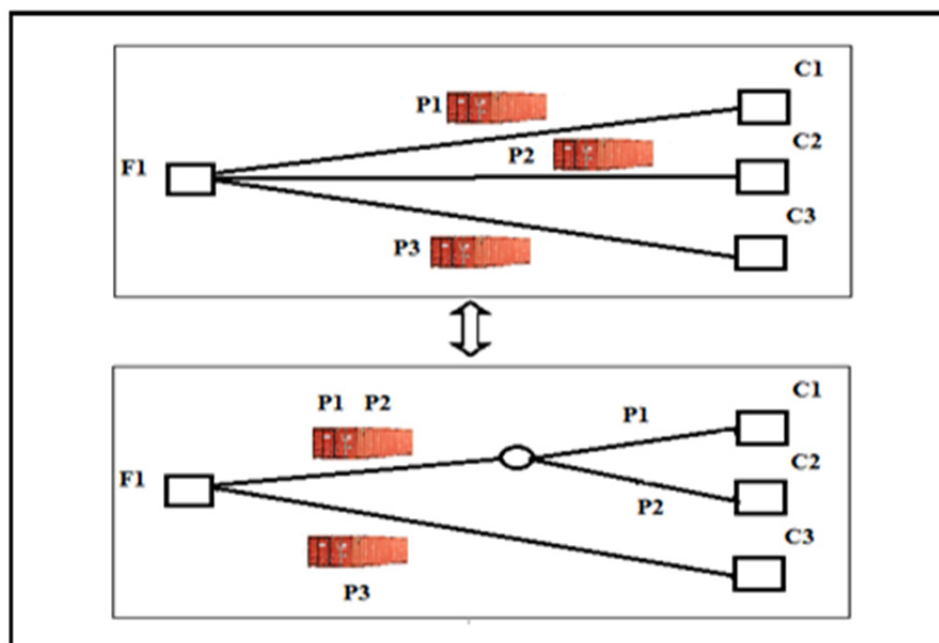


Figure 3.2 Configuration du transport collaboratif

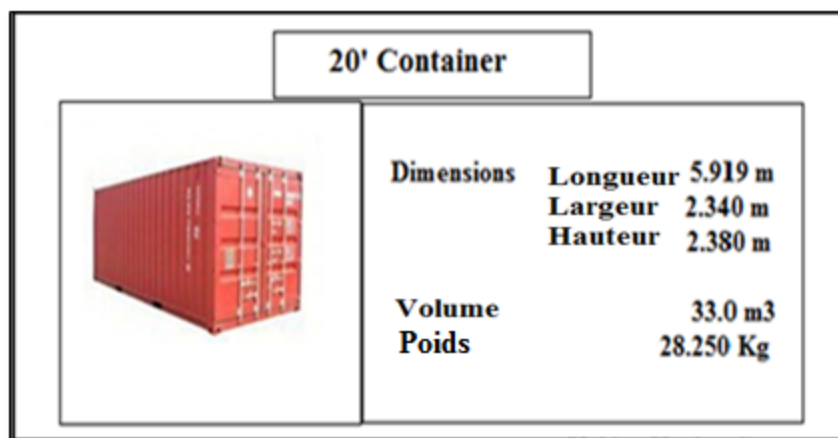


Figure 3.3 Description du conteneur

3.3 Modèle mathématique

Le modèle d'optimisation présenté dans ce chapitre permet de déterminer la quantité optimale de chaque produit livré par le mode aérien, LCL et FCL, le niveau de stock de chaque produit à chaque client, le nombre de conteneurs utilisé pour livrer les produits de chaque fournisseur à chaque client en absence de collaboration, le nombre de conteneurs utilisés pour livrer les clients de chaque fournisseur dans le cas de la consolidation. La fonction-objectif et les contraintes sont formulées en un modèle mathématique linéaire en nombres mixtes (MILP).

3.3.1 Ensembles et indices

$p \in P$: Produits.

$i \in F$: Fournisseurs.

$j \in C$: Clients.

$t \in T$: Périodes.

3.3.2 Paramètres du modèle mathématique

Les paramètres du modèle mathématique de la collaboration horizontale sont :

d_{pj^t} : Demande du produit $p \in P$ (en Kg) du client $j \in C$ à la période $t \in T$.

h_{pj} : Coût de stockage du produit $p \in P$ au client $j \in C$.

a_{pi} : Coût variable d'utilisation d'un conteneur consolidé pour le produit $p \in P$ (\$/Conteneur) du fournisseur $i \in F$. (Il est calculé par la somme du coût d'utilisation du conteneur et le coût additionnel de séparation des livraisons).

b : Coût fixe d'utilisation d'un conteneur (\$/conteneur).

c_{pij}^f : Coût variable de transport par le mode maritime (FCL) (\$/m³) du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.

- c_{pij}^l : Coût variable de transport par le mode maritime (LCL) du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ (\$/m³).
- c_{pij}^a : Coût de transport par le mode aérien du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ (\$/kg).
- v : Capacité volumique du conteneur (m³).
- s : Capacité massique du conteneur (kg).
- w_p : Densité du produit $p \in P$ (Kg/m³).
- l_{ij}^m : Délai de livraison du mode de transport maritime du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.
- l_{ij}^a : Délai de livraison du mode de transport aérien du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.
- s_{pj}^{st} : Quantité minimale du produit $p \in P$ au client $j \in C$.
- t_p^{axe} : Taxe sur le produit $p \in P$.
- d_p^{roit} : Droit de douane sur le produit $p \in P$.
- M : ‘Grand M’ très grand nombre calculé par la somme de la demande totale sur toutes les périodes ($M = \sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} d_{pjt}$).
- M' : ‘Grand M’ très grand nombre calculé par le nombre maximum de conteneurs qui peut être utilisé ($M' = \sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} d_{pjt} / s$).

3.3.3 Variables de décision du modèle mathématique

Les variables de décision du modèle mathématique de la collaboration horizontale sont :

- A_{pijt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg), livrée par le mode de transport aérien du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- L_{pijt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg) livrée par le mode maritime *Less than Container*

Load (LCL) du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période $t \in T$.

F_{pijt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg) livrée par le mode de transport maritime *Full Container Load* (FCL) du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période de temps $t \in T$.

I_{pit} : Niveau du stock du produit $p \in P$ (kg) au client $j \in C$ à la période de temps $t \in T$.

N_{ijt} : Nombre de conteneurs classiques utilisés (unités) du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période de temps $t \in T$.

Y_{it} : Nombre de conteneurs consolidés utilisés (unités) par le fournisseur $i \in F$ à la période de temps $t \in T$.

G_{pij} : Variable binaire égale à 1 si le produit $p \in P$ est livré du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$, 0 sinon

3.3.4 Fonction-objectif du modèle mathématique

La fonction-objectif (3.1) est formulée comme suit :

Min $Z =$

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} h_{pj} I_{pijt}}_{(1)} + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{t \in T} a_{pi} Y_{it}}_{(2)} + \underbrace{\sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} b N_{ijt}}_{(3)} \\
 & + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} (c_{pij}^f (F_{pijt} / w_p) + c_{pij}^l (L_{pijt} / w_p))}_{(4)} + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} (h_{pj} l_{ij}^m F_{pijt} + h_{pj} l_{ij}^m L_{pijt})}_{(5)} \\
 & + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} (c_{pij}^a + h_{pj} l_{ij}^a) A_{pijt}}_{(6)} + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} (t_p^{axe} + d_p^{roit}) (A_{pijt} + L_{pijt} + F_{pijt})}_{(7)}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Dans l'équation (3.1), le premier terme (1) exprime le coût total de stockage des produits durant l'horizon de planification. Le deuxième terme (2) représente le coût total d'utilisation des conteneurs consolidés par les fournisseurs. Le troisième terme (3) exprime le coût total

des conteneurs classiques utilisés pour livrer les produits des fournisseurs aux clients. Le quatrième terme (4) est le coût total du transport maritime qui est la somme des coûts de transport par le mode FCL et LCL. Le cinquième terme (5) exprime le coût de transit maritime de tous les produits. Le sixième terme (6) est le coût total de transport aérien. Et enfin, le septième terme (7) représente les taxes et les droits de douane respectivement appliqués sur les produits durant le transport international.

3.3.5 Contraintes du modèle mathématique

La fonction-objectif (3.1) est sujette aux *contraintes* :

$$I_{pjt} = I_{pjt-1} + \sum_{i \in F} F_{pijt-l_{ij}^m} + \sum_{i \in F} L_{pijt-l_{ij}^m} + \sum_{i \in F} A_{pijt-l_{ij}^a} - d_{pjt} \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (3.2)$$

$$I_{pjt} \geq s_{pj}^{st} \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (3.3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} (L_{pijt} / w_p) \leq v \quad \forall t \in T, i \in F \quad (3.4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} (F_{pijt} / w_p) \leq v Y_{it} + M \sum_{j \in C} N_{ijt} \quad \forall t \in T, i \in F \quad (3.5)$$

$$\sum_{p \in P} (F_{pijt} / w_p) \leq v N_{ijt} + M Y_{it} \quad \forall t \in T, i \in F, j \in C \quad (3.6)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} L_{pijt} \leq s \quad \forall t \in T, i \in F \quad (3.7)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} F_{pijt} \leq s Y_{it} + M \sum_{j \in C} N_{ijt} \quad \forall t \in T, i \in F \quad (3.8)$$

$$\sum_{p \in P} F_{pijt} \leq s N_{ijt} + M Y_{it} \quad \forall t \in T, i \in F, j \in C \quad (3.9)$$

$$Y_{it} \leq M (1 - \sum_{j \in C} N_{ijt}) \quad \forall i \in F, t \in T \quad (3.10)$$

$$N_{ijt} \leq M (1 - Y_{it}) \quad \forall i \in F, j \in C, t \in T \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in F} G_{pij} = 1 \quad \forall p \in P, j \in C \quad (3.12)$$

$$\sum_{t \in T} A_{pijt} \leq MG_{pij} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (3.13)$$

$$\sum_{t \in T} L_{pijt} \leq MG_{pij} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (3.14)$$

$$\sum_{t \in T} F_{pijt} \leq MG_{pij} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (3.15)$$

$$A_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C, t \in T \quad (3.16)$$

$$L_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C, t \in T \quad (3.17)$$

$$F_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C, t \in T \quad (3.18)$$

$$N_{ijt} \geq 0, \text{entier} \quad \forall i \in F, j \in C, t \in T \quad (3.19)$$

$$Y_{it} \geq 0, \text{entier} \quad \forall i \in F, t \in T \quad (3.20)$$

$$G_{pij} \text{ binaire} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (3.21)$$

La contrainte (3.2) assure l'équilibre des flux dans le système. Pour chaque Produit, chaque client et chaque période de temps, le stock à la période (t) est égal à la différence entre la somme du stock de la période (t-1) et la quantité de produits transportés par le mode maritime et aérien à la période (t-délai de livraison); et la demande à la période t. La contrainte (3.3) assure que le niveau de stock est supérieur au stock de sécurité.

Les contraintes (3.4) et (3.7) assurent que le volume et le poids maximaux sont respectés respectivement pour le LCL. Le transporteur s'assure que l'ensemble des palettes transportées aye un poids inférieure à la capacité massique du conteneur et un volume inférieure à la capacité volumique du conteneur. Les contraintes (3.5) (3.6) (3.8) et (3.9) assurent que le volume et le poids maximaux sont respectés respectivement pour le FCL. Le fournisseur s'assure que l'ensemble des produits envoyé à ses clients aye un volume inférieure à la capacité volumique du conteneur et un poids inférieure à la capacité massique du conteneur.

Les contraintes (3.10) et (3.11) reflètent le choix de la consolidation des livraisons de telle sorte que si le modèle choisit de consolider, il ne peut pas affecter un conteneur pour un seul

client et vice versa. Si le fournisseur choisi d'envoyer un conteneur pour chacun de ses clients la variable de décision qui donne le nombre de conteneurs consolidés est nulle. Si le fournisseur choisi d'envoyer un conteneur consolidé à tous ses clients, la variable de décision qui donne le nombre de conteneurs non consolidés est nulle.

La contrainte (3.12) assure que pour une demande d'un produit d'un client, un seul fournisseur est sélectionné pour le produit sur tout l'horizon de planification. Les contraintes (3.13) (3.14) et (3.15) expriment le fait que si le fournisseur n'est pas choisi, toutes les quantités relatives à ce fournisseur sont nulles.

Les contraintes (3.16) (3.17) et (3.18) sont les contraintes de positivité des variables de décision. Les contraintes (3.19) et (3.20) assurent que le nombre de conteneurs est un entier. Enfin, la contrainte (3.21) qui assurent que la variable de décision G_{pij} est binaire.

3.4 Étude de cas et résultats

Dans cette section, nous analysons les résultats obtenus du modèle d'aide à la décision réalisé dans la partie précédente et nous comparons nos résultats avec les résultats des travaux antérieurs dans ce domaine. L'objectif est de déterminer l'impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale.

3.4.1 Collecte de données

Avec l'aide d'une entreprise partenaire, nous avons pu mettre en place une configuration réelle d'un réseau constitué de deux fournisseurs, deux clients et deux types de produits. Le réseau est représenté sur la figure 5.4 réalisée sur le logiciel *LogicNet* d'*IBM*.

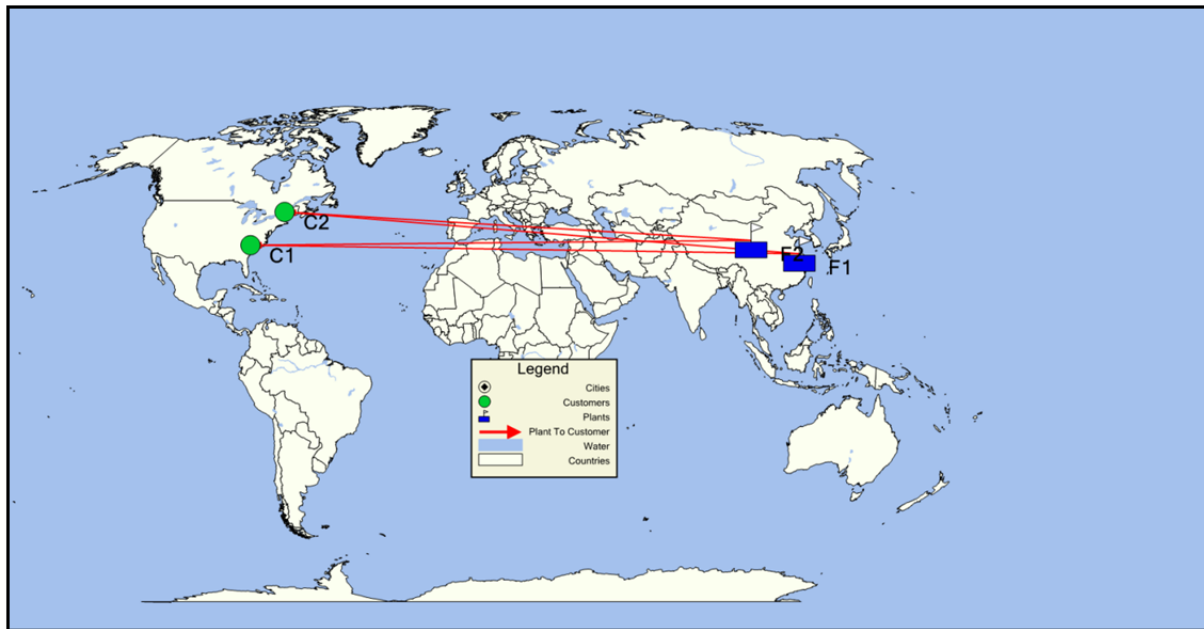


Figure 3.4 Représentation des sites de l'étude de cas sur *LogicNet Plus®*

Les données relatives au géocodage des entreprises sur *LogicNet* sont présentées en annexe (Voir ANNEXE II).

Les deux fournisseurs choisis dans cette étude de cas sont : F1 et F2. Le premier fournisseur est le premier fabricant de feuilles thermoplastiques en Asie. Sa vision est d'être le leader de l'industrie de la fabrication de feuilles thermoplastiques à travers l'innovation continue et le développement durable et sa mission est de satisfaire les clients à travers le monde avec des produits et services de confiance, en préconisant des solutions vertes. Le deuxième fournisseur est le premier fabricant d'emballage de différents types en Asie. Son objectif est de satisfaire la demande de ses clients à travers le monde en fournissant des produits de première qualité.

Les deux clients choisis dans l'étude de cas sont : C1 et C2. Le premier client est une entreprise d'usinage et soudure spécialisée en transformation de caissons et produits d'aluminium et la fabrication de fenêtres pour autobus scolaires. Sa vision est de fabriquer des produits de qualité en moins de temps possible. Son objectif est d'atteindre la satisfaction

totale de sa clientèle, en maintenant une gamme de produits innovatrice et de haute qualité au meilleur prix et en offrant le meilleur service après-vente. Le deuxième client est une entreprise chef de file dans la fabrication et la commercialisation de réservoirs en acier pour l'entreposage de produits pétroliers. Par le biais d'un programme continu de recherche et de développement, elle vise à combler les besoins de sa clientèle en offrant des produits et procédés innovateurs et à établir une synergie gagnante entre le client et l'entreprise.

Les deux produits choisis sont le caoutchouc et le polycarbonate utilisés par les deux clients dans la fabrication de leurs produits respectifs. Une représentation des relations entre les clients et les fournisseurs du réseau sur *LogicNet* est présentée sur la figure 3.5.

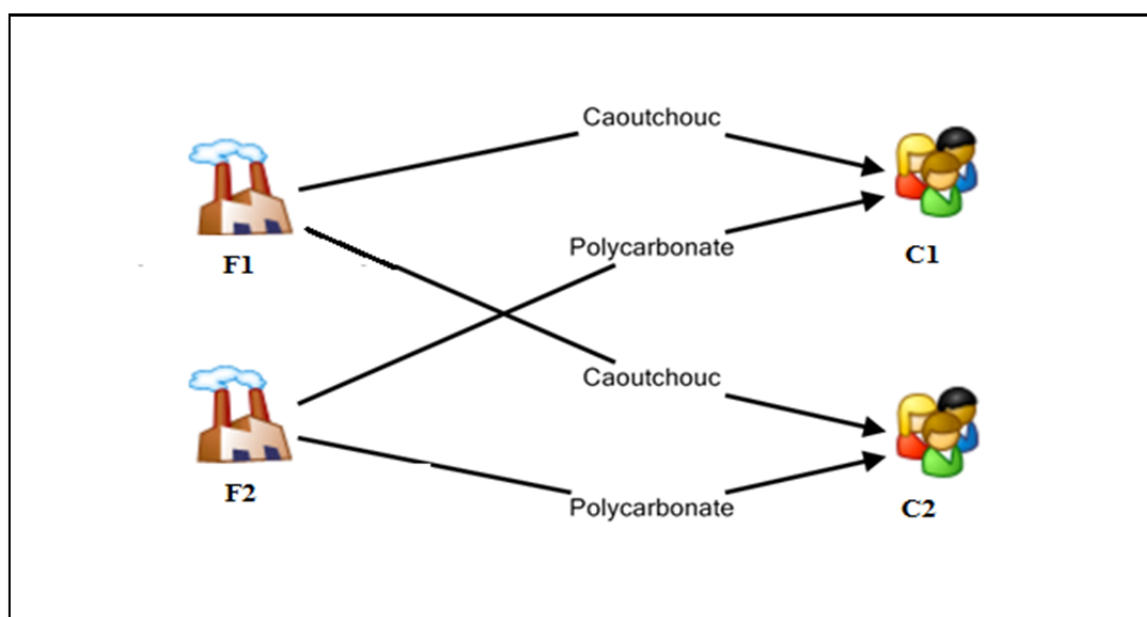


Figure 3.5 Représentation des voies fournisseurs-clients de l'étude de cas sur *LogicNet*

L'étude de cas présentée dans cette partie est inspirée de l'étude de cas présentée par Bhatnagar, Mehta et Chong Teo (2011) qui se base sur des données issues de l'industrie. Le Tableau 3.1 indique les paramètres retenus de l'article et utilisés dans l'expérimentation.

Tableau 3.1 Paramètres de l'étude de cas

Taille de l'horizon de planification	50 semaines
Ration de coût de la livraison aérienne/ livraison maritime	6:1
Prévision de la demande par semaine	$\sim U(35,105)$
Stock de sécurité	0
Délai de livraison aérien	1 semaine
Délai de livraison maritime	4 semaines

Le tableau 3.2 indique les paramètres supplémentaires issus de la littérature et des factures des entreprises de transport.

Tableau 3.2 Paramètres supplémentaires

Paramètre	Valeur/Source
Nombre de fournisseurs	2
Nombre de clients	2
Nombre de produits	2
Nombre de modes de transport	2
Ratio des densités des produits (α)	1:1
Taxes	% coût produit
Droits de douane	% coût du produit
Coût fixe du conteneur	Base de données de la banque mondiale
Coût variable du conteneur consolidé	Coût fixe du conteneur + coût séparation des livraisons (<i>Voir ANNEXE I</i>)
Capacité volumique du conteneur	33 m ³
Capacité massique du conteneur	28 250 kg

La taille de l'horizon de planification est de 50 semaines afin d'avoir une planification annuelle des livraisons. On utilise un ratio coût de 6:1 entre le coût de livraison aérien et le coût de livraison maritime comme utilisé dans la majorité des marchés. Pour l'étude, la demande suit une distribution uniforme $\sim U(35, 105)$ et aucun stock de sécurité n'est considéré. La distribution uniforme permet de générer une demande positive. Le coût du conteneur est déterminé sur la base des données de la banque mondiale (*Voir ANNEXE I*). Le coût du conteneur consolidé est calculé par la somme du coût d'utilisation du conteneur et les coûts supplémentaires de manutention due à la séparation des livraisons. Les taxes et les droits de douane sont calculés par un pourcentage du coût du produit en fonction de son origine et sa destination. La formule de calcul est fournie par une agence de transport internationale.

3.4.2 Scénario de base

Nous avons commencé par reproduire l'étude de cas de Bhatnagar, Mehta et Chong Teo (2011) avec une demande par semaine qui suit une distribution uniforme $\sim U(35, 105)$. Pour cela, nous avons implémenté le modèle mathématique linéaire MILP sur *OPL CPLEX* et nous avons simulé plusieurs scénarios.

La solution obtenue a été d'utiliser *Less than Container Load* pour satisfaire toute la demande, car les quantités sont petites, ce qui confirme les résultats de Beliveau (2010). Les livraisons de chaque produit pour chaque client sont livrées séparément comme représentées sur la figure 3.6. La planification des livraisons de chaque produit pour chaque client de chaque fournisseur se présente sous forme d'un vecteur de taille 50 pour chaque mode de transport (aérien, FCI, LCL). Un extrait des valeurs de planification pour le mode LCL est présenté au tableau 3.3. Les différents coûts obtenus sont présentés au tableau 3.4.

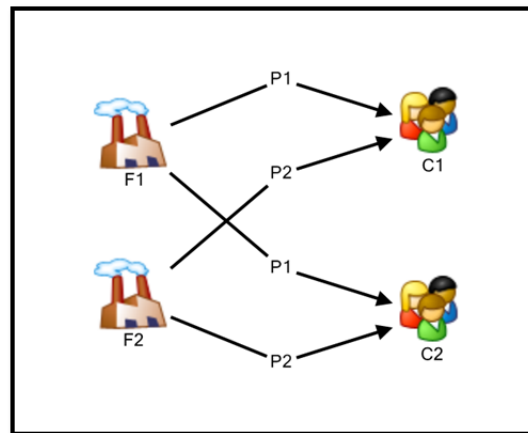


Figure 3.6 Résultat de l'étude de cas

Tableau 3.3 Extrait de la planification des livraisons du mode de transport LCL

Quantité de produits à livrer par le mode de transport LCL (kg)									
Périodes (semaines)	...	20	21	22	23	24	25	26	...
F1 C1 P1	...	63	62	99	97	51	63	69	...
F1 C1 P2	...	0	0	0	0	0	0	0	...
F1 C2 P1	...	62	38	90	43	81	59	71	...
F1 C2 P2	...	0	0	0	0	0	0	0	...
F2 C1 P1	...	0	0	0	0	0	0	0	...
F2 C1 P2	...	62	57	44	101	101	78	101	...
F2 C2 P1	...	0	0	0	0	0	0	0	...
F2 C2 P2	...	85	89	87	72	55	38	65	...

Tableau 3.4 Répartition des coûts du scénario de base

Type	Coût (\$)
Fonction objectif	10 406
Coût de transport	10 374

Pour pouvoir appliquer la collaboration entre les clients, il est nécessaire que le modèle atteigne le *Full Container Load*. Pour cela nous allons déterminer à partir de quelle demande, le *Full Container Load* devient plus économique.

Deux scénarios sont considérés. Le premier scénario offre la possibilité d'utiliser le mode de transport maritime et aérien, mais dans le mode de transport maritime, il ne propose que le type de livraison LCL. Le deuxième scénario offre les deux modes de transport maritime et aérien avec le type de livraison FCL uniquement. Ainsi, nous avons augmenté la demande (les demandes de chaque produit pour chaque client suivent la même distribution) étape par étape pour jusqu'à une demande qui suit une distribution uniforme $\sim U(35, 3000)$ (Figure 3.7).

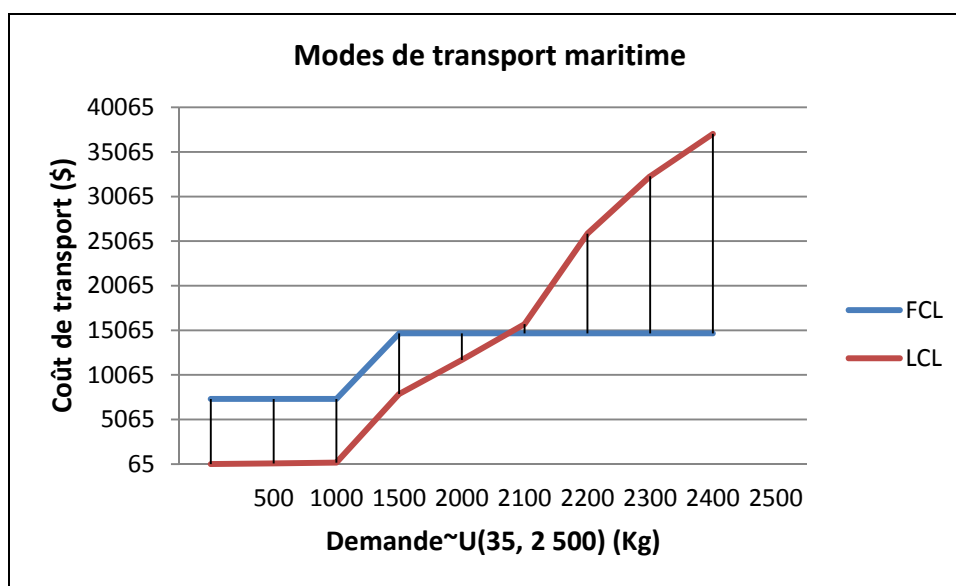


Figure 3.7 Comparaison entre les modes de transport maritime

Ce graphique décrit la variation du coût de transport en fonction de la distribution de la demande. Quand la quantité à transporter est petite, il est plus économique de la transporter en palette au lieu de réserver tout un conteneur. Par contre quand la quantité à livrer devient importante, l'envoyer en palette revient plus coûteux que de l'envoyer en un conteneur complet. Il est clair que le FCL commence à devenir plus économique à partir d'une demande $\sim U(35, 2100)$.

Afin de déterminer ultérieurement l'impact de la collaboration entre les clients sur la CAI, il est important d'analyser la distribution des coûts de la chaîne d'approvisionnement en fonction de la variation de la demande. Nous allons, dans ce qui suit, faire varier la demande de U (35, 500) à U (35, 2300) et déterminer le coût total, coût de stockage, coût de transport et autre pour chaque distribution de la demande.

Tableau 3.5 Résultats du scénario de base (sans consolidation)

Demande ~U(35, 2 300)	200	300	400	500	1000	1500	2000	2100	2200	2300
Coût total	17 682	25 405	54 237	46 375	1 787 697	15 933 219	34 762 853	33 763 210	36 405 119	39 654 436
Coût de stockage	0	154	4367	1 364	8 160	7 758	21 991	13 373	24 076	20 876
Coût de transport	17 627	25 172	49 765	44 886	1 779 306	15 925 113	34 740 366	33 749 338	36 380 492	39 632 999
Autres	55	78	104	124	230	347	495	498	551	561
Indicateurs de performances										
Niveau des stocks	0	772	21 838	6 821	40 801	80 258	11 220	66 865	120 380	104 383

De cette analyse, nous déduisons que le coût total augmente avec l'augmentation de la demande à satisfaire. Le coût de transport augmente car la quantité à livrer est de plus en plus grande ce qui engendre des coûts de transport additionnels.

3.4.3 Collaboration entre les clients

La collaboration entre les clients est représentée par le fait que les clients du même fournisseur partagent le même conteneur donc le fournisseur peut consolider ses livraisons. Afin de déterminer l'effet de la consolidation des livraisons des clients, nous avons simulé le modèle pour différentes instances de demande d'une distribution U (35, 2 000) à U (35, 5 000) et nous nous sommes focalisés sur le choix des fournisseurs. Nous avons remarqué que

la consolidation des livraisons dépend de la sélection des fournisseurs. Par exemple, pour une demande $\sim U(35, 3000)$, les commandes du client C1 sont assignées au fournisseur F1 et les commandes du client C2 sont assignées au fournisseur F2. Dans ce cas, il n'y a pas de consolidation des livraisons (Figure 3.8).

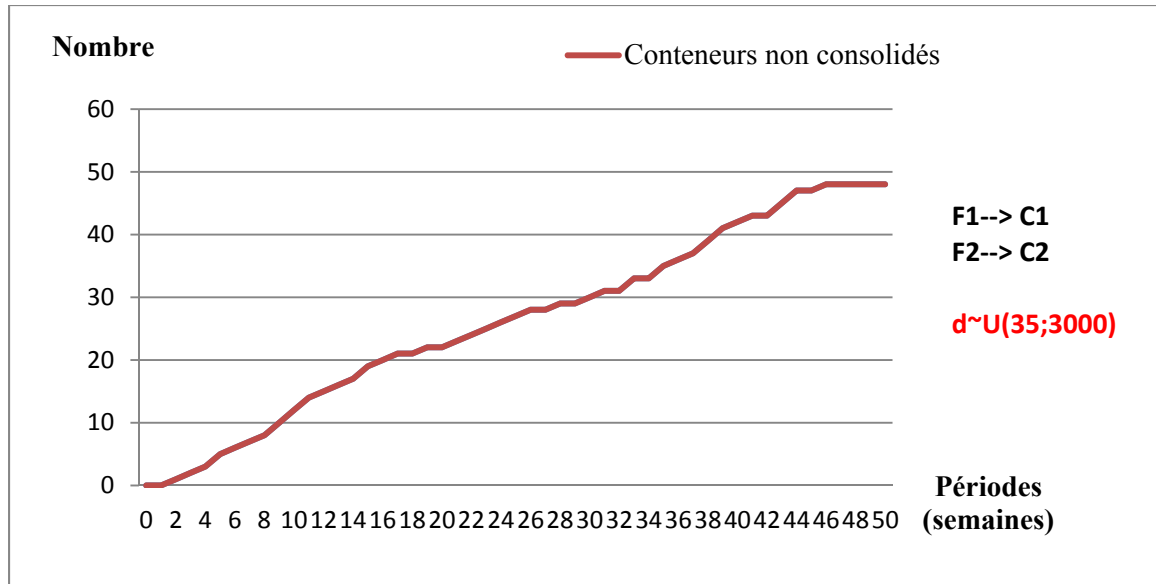


Figure 3.8 Cas 1 : Variation du nombre de conteneurs durant l'horizon de planification

Par contre, pour une demande $\sim U(35, 5000)$, les commandes des clients C1 et C2 sont assignées aux deux fournisseurs F1 et F2. Dans ce cas, il y'a, dans certaines périodes de temps, une consolidation des livraisons (Figure 3.9). Nous avons conclu que la consolidation ne se fait que, si et seulement si, un fournisseur est choisi pour plusieurs clients. Dans ce cas, il peut consolider les livraisons des clients.

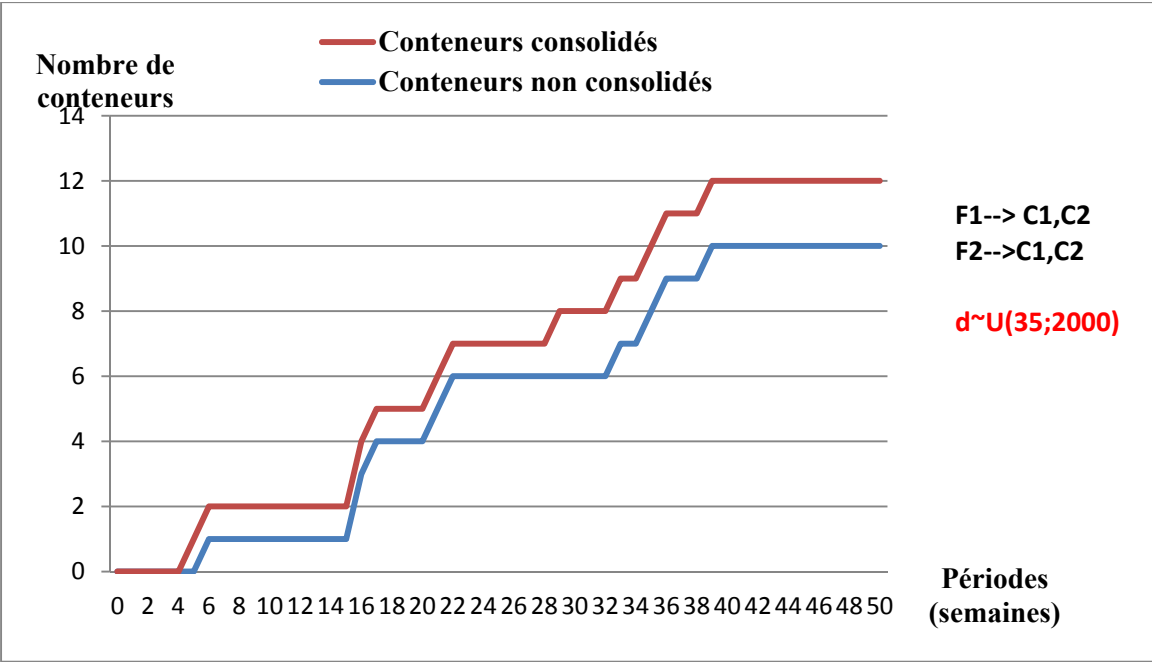


Figure 3.9 Cas 2 : Variation du nombre de conteneurs durant l’horizon de planification

3.4.4 Impact de la collaboration horizontale entre les clients sur la GCAI

Pour mieux analyser l’impact de la collaboration horizontale entre les clients du réseau de la CAI, nous avons réalisé une analyse comparative entre le modèle de base (sans consolidation) et le modèle de collaboration horizontale. Nous avons pris une configuration caractérisée par une demande $\sim U(35, 2500)$. Les résultats de l’analyse sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 3.6 Tableau comparatif des résultats de la collaboration horizontale

Modèle	Coût total	Coût de transport	Nombre de conteneurs consolidés	Niveau des stocks
Sans collaboration	28 583 174	28 570 782	0	59 609
Avec collaboration horizontale	27 234 632	27 233 323	20	4 195

D'après les résultats obtenus, la collaboration horizontale entre les clients de la chaîne d'approvisionnement internationale permet de minimiser le coût total de la chaîne d'approvisionnement internationale en minimisant le coût de transport, et de diminuer le niveau des stocks. Par conséquent, le partage d'information sur les capacités et les types de produits ainsi que les ressources matérielles (conteneurs) entre les clients de la CAI permet de minimiser les coûts liés au processus de transport.

Pour pouvoir déterminer le pourcentage de gain de la collaboration horizontale, nous avons fait varier la demande de U (35, 500) à U (35, 2300) et déterminer le coût total, coût de stockage, coût de transport et autres pour chaque distribution de la demande.

Tableau 3.7 Résultats du scénario de collaboration horizontale

Demande ~U(35,...)	200	300	400	500	1000	1500	2000	2100	2200	2300
Coût total	17 682	25 405	54 237	46 375	1 787 697	15 789 070	33 587 961	31 623 458	35 562 262	38 931 612
Coût de stockage	0	154	4367	1 364	8 160	7 758	21 991	7 808	5 397	30 431
Coût de transport	17 627	25 172	49 765	44 8868	1 779 306	15 772	33 585 221	31 615 152	35 556 314	38 927 619
Autres	55	78	104	124	230	347	495	552 82498	551	561
Indicateurs de performances										
Nombre conteneurs consolidé	0	0	0	0	0	11	26	13	62	68
Niveau des stocks	0	772	21 838	6 821	40 801	80 258	11 220	39 041	269 568	17 157

Le gain est déterminé à partir de la comparaison entre les deux tableaux des résultats des scénarios de base et de collaboration (Tableau 3.5 et Tableau 3.7). Pour chaque distribution de la demande, la différence entre les deux fonctions-objectif est calculée afin de déterminer le pourcentage de gain. Après calcul, nous obtenons le tableau 3.8 et la figure 3.10.

Tableau 3.8 Gain de la collaboration horizontale

Demande ~U(35,...)	200	300	400	500	1000	1500	2000	2100	2200	2300
Coût total (sans collaboration)	17682	25405	54237	46375	1787697	15933219	34762853	33763210	36405119	39654436
Coût total (avec collaboration)	17682	25405	54237	46375	178769742	15789070	33587961	31623458	35562262	38931612
% de gain	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	3,38	3,08	2,32	1,82

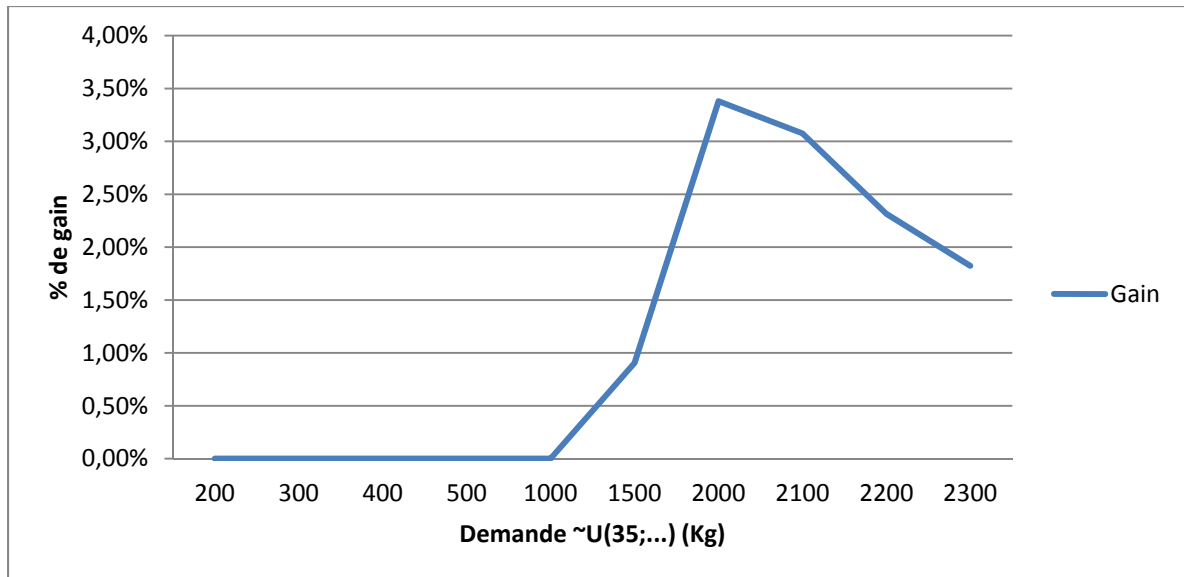


Figure 3.10 Variation du pourcentage de gain en fonction de la distribution de la demande

Nous pouvons déduire que le pourcentage de gain dans la collaboration horizontale augmente avec l'augmentation de la demande. Plus la demande pour chaque produit est importante, plus l'utilisation des conteneurs pleins (FCL) est favorable ce qui incite en fonction de la densité des produits l'utilisation des conteneurs consolidés. De plus, le coût de transport et le niveau des stocks diminuent dans le cas de la collaboration horizontale.

3.4.5 Impact de la consolidation des livraisons sur les clients

Durant les simulations effectuées sur le modèle, nous avons remarqué que dans certains cas, il est plus économique de ne pas consolider les livraisons des clients. Nous avons déterminé pourquoi et comment la consolidation peut être plus coûteuse.

Pour cela, nous avons roulé une configuration caractérisée par une demande $\sim U(35, 2000)$ et un ratio de densité de 5 pour deux cas. Le premier cas est la configuration avec la consolidation des livraisons. Dans ce cas, le modèle est contraint de consolider les livraisons des clients. Le deuxième cas est la configuration sans la consolidation des livraisons. Dans ce

cas, le modèle ne propose pas de consolider les livraisons. Les résultats des de cas sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 3.9 Résultats du changement de l'effet de consolidation

	Case 1: Avec consolidation	Case 2: Sans consolidation
Fonction objectif	9 798 413	9 789 241
Coût des stocks	25 800	25 649
Coût de transport	9 772 138	9 763 117
Autres	474	474
Coûts des conteneurs	7 376	7 360
Nombre de conteneurs classiques	87	92
Nombre de conteneurs consolidés	2	0

Le cas de consolidation est plus coûteux que le cas de non-consolidation. Cette différence est due à l'utilisation des conteneurs consolidés qui a un impact direct sur le coût de stockage et le coût des conteneurs. Nous avons remarqué une augmentation dans le coût des stocks et le coût des conteneurs. Nous avons aussi remarqué une augmentation du nombre de conteneurs non consolidés suite à la disparition des conteneurs consolidés.

Afin d'expliquer cette augmentation des coûts, une analyse détaillée des coûts a été faite. Dans le cas 1, le fournisseur F1 utilise 2 conteneurs consolidés pour livrer le client C1 avec le produit P1 et le client C2 avec le produit P2. Dans le cas 2, les deux conteneurs sont remplacés par des conteneurs non consolidés.

Pour le premier client, le coût de stockage et des conteneurs ont augmenté, car la quantité du produit P2 livrée au client C1 dans les deux conteneurs consolidés et un conteneur non consolidé a été livrée dans deux conteneurs non consolidés dans le cas 2. Donc, le client C1 n'avait pas d'intérêt à consolider ses livraisons (Figure 3.11).

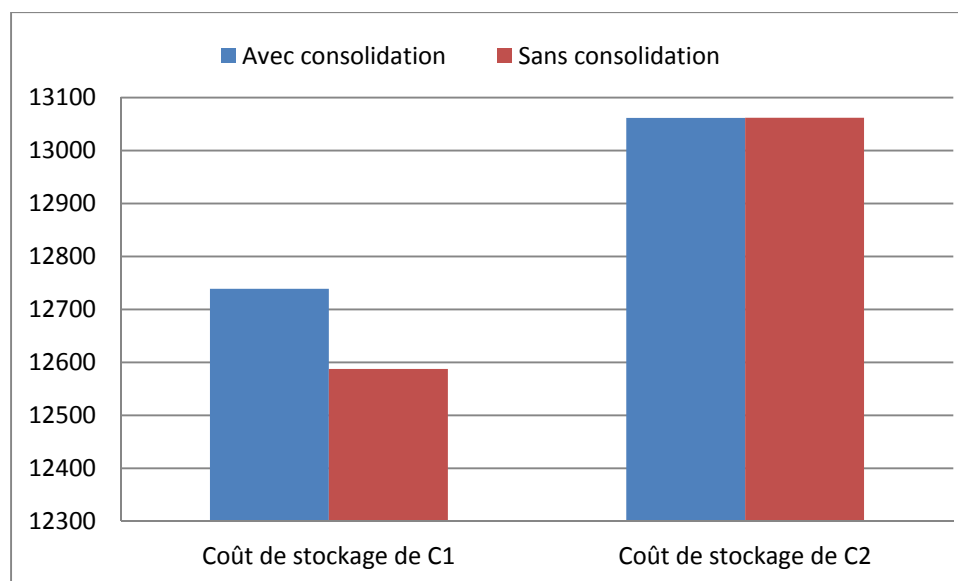


Figure 3.11 Répartition des coûts de stock

Pour le deuxième client, les coûts de stockage et d'utilisation des conteneurs ont diminué dans le cas de la consolidation. Les produits délivrés au client C2 dans le cas 1 dans des conteneurs consolidés avec d'autres produits ont été délivrés, dans le cas 2, dans un conteneur non consolidé. Le conteneur non consolidé, dans le cas 2, a été utilisé à 75 % en volume et à 7 % en poids. Les conteneurs consolidés, dans le cas 1, ont été utilisés à 99 % en volume et à 17 % en poids. C'est pour cette raison que le coût a diminué dans le cas de la consolidation (Figure 3.12).

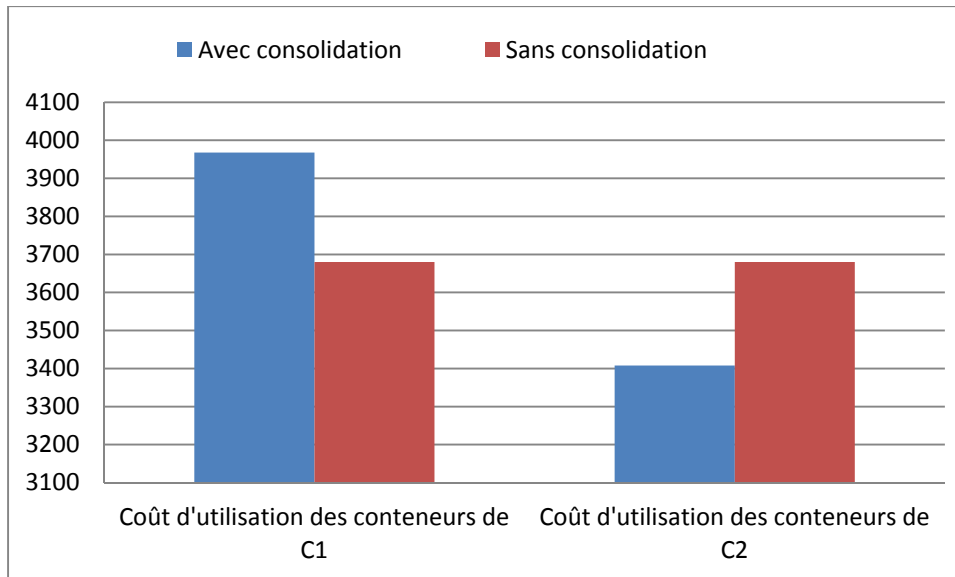


Figure 3.12 Répartition des coûts d'utilisation des conteneurs

Dans ce scénario, le client C1 a payé plus pour la consolidation, car ses produits dans le cas 1 ont été livrés dans deux conteneurs consolidés et un conteneur non consolidé, mais dans le cas 2 il a utilisé seulement deux conteneurs non consolidés. Par contre, le client C2 a payé moins pour la consolidation, car au lieu d'utiliser un conteneur complet non consolidé avec une perte de 25 % en volume, il a partagé ses livraisons dans deux conteneurs consolidés et a payé que pour 75 % de volume.

3.5 Analyse de sensibilité

3.5.1 Variation du rapport de densité des produits

Dans ce scénario, nous étudions l'impact de la densité des produits sur la consolidation des livraisons. Nous avons pris une configuration caractérisée par une demande $\sim U(35, 2500)$. Nous avons simulé le modèle avec différents ratios de densité des produits. Nous avons noté ce ratio α tel que $\alpha = \frac{wp_1}{wp_2}$. Le ratio α varie de 1 à 30 avec un pas de 5. La figure 3.13 démontre les résultats obtenus.

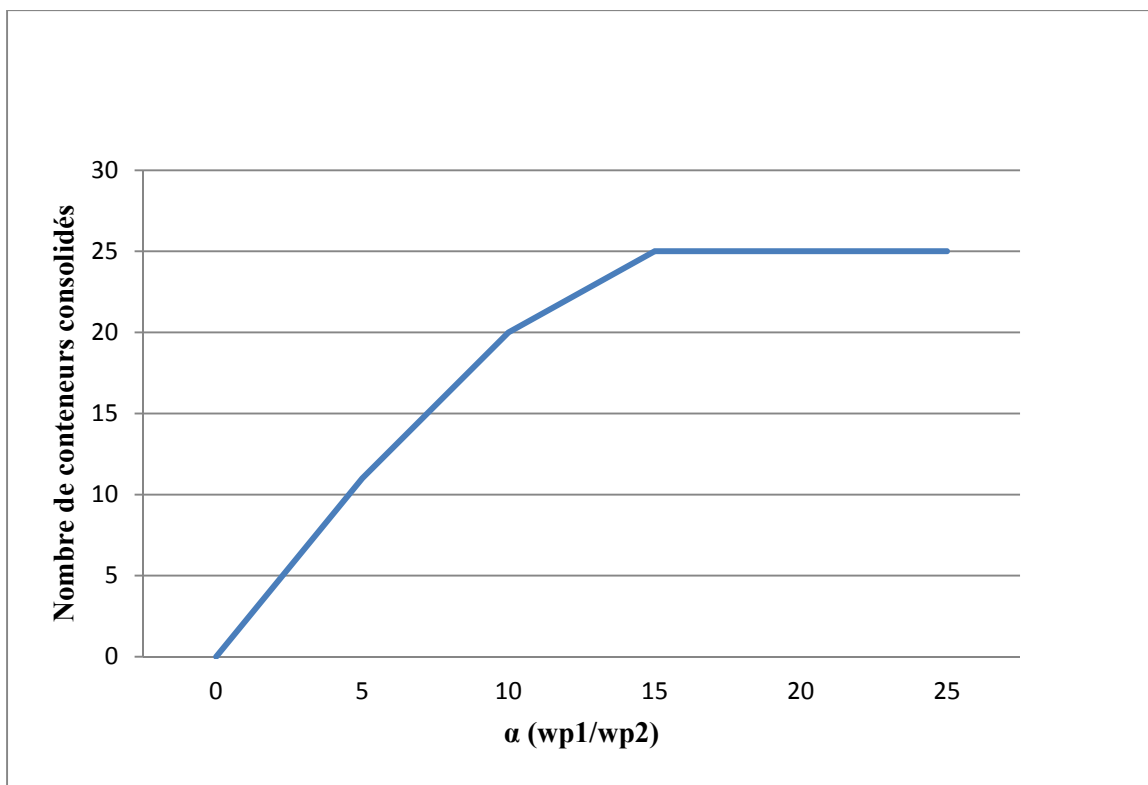


Figure 3.13 Variation de la consolidation en fonction de la densité des produits

Les résultats indiquent que la consolidation est plus présente quand le ratio α est plus grand. Ceci peut être expliqué par le fait que si α est grand alors la densité du premier produit est plus importante que la densité du deuxième produit. Donc, le premier produit prend beaucoup de poids et le deuxième produit prend beaucoup de volume. La combinaison des deux produits est parfaite pour les conteneurs. C'est pour cela que plus α est grand plus la consolidation est favorable.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons répondu à la première question de recherche : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale entre les clients du réseau sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale* » ?

Nous avons présenté un modèle mathématique linéaire en nombre mixte implémenté sur *CPLEX* qui présente la collaboration horizontale entre les clients par la consolidation des livraisons en un seul conteneur. Nous avons simulé plusieurs scénarios et configurations et nous avons déduit que la collaboration horizontale entre les clients de la chaîne d'approvisionnement :

- 1- ne peut se faire que si les clients acceptent de partager des informations entre eux concernant les types de produits, la demande et les capacités.
- 2- devient plus favorable avec l'augmentation du rapport de densité entre les produits à livrer.

Cela dit, dans cette partie, les commandes des clients sont égales à leurs consommations. Les clients planifient leurs commandes indépendamment des fournisseurs. Il n'y a pas d'échange d'information entre les clients et les fournisseurs.

CHAPITRE 4

MODÈLE DE COLLABORATION VERTICALE ET HORIZONTALE ENTRE LES CLIENTS ET LES FOURNISSEURS

4.1 Introduction

Dans cette partie, nous reprenons la même représentation du réseau du modèle mathématique pour la planification des livraisons dans la partie de la collaboration horizontale entre les clients avec les mêmes paramètres. La différence se situe au niveau de la demande. Dans le premier modèle, la demande est égale à la consommation des clients, à chaque période, la demande du client est connue (Figure 4.1).

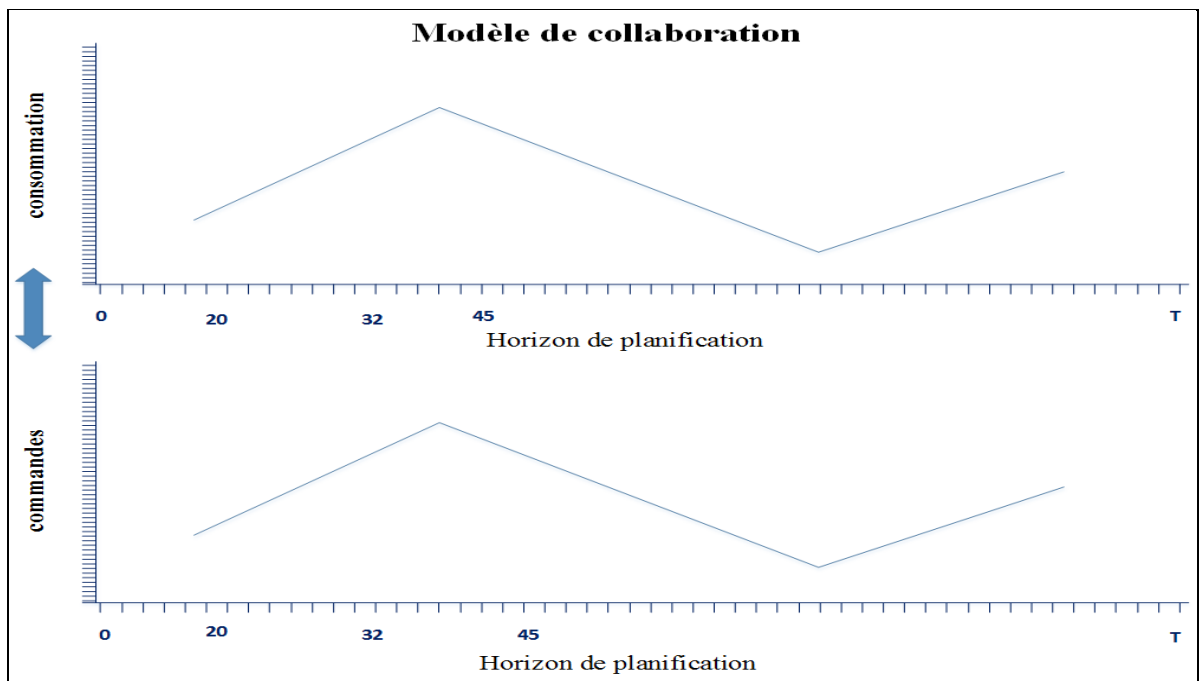


Figure 4.1 Représentation de la distribution de la demande dans le problème de collaboration

Pour déterminer la taille des lots à commander, une collaboration étroite entre les clients et les fournisseurs du réseau est nécessaire. Les clients doivent collaborer entre eux en partageant les informations relatives à leurs besoins et capacités pour pouvoir déterminer la

quantité à livrer pour chaque client à chaque période. Les clients doivent collaborer aussi avec les fournisseurs en leur communiquant toute l'information concernant leurs besoins pour que les fournisseurs puissent synchroniser la planification des livraisons avec les commandes des clients.

Dans ce modèle, le client exprime un besoin global à satisfaire sur toute la période de planification et la consommation des clients en produits est connue (Figure 4.2). Pour cela une nouvelle variable de décision est introduite qui représente la taille du lot à commander pour chaque période de temps. Pour éviter que le modèle mathématique ne commande toute la quantité en une seule période, une contrainte sur la taille du lot a été ajoutée. Cette dernière exprime le fait que la taille du lot doit dépasser la demande minimale à satisfaire à chaque période.

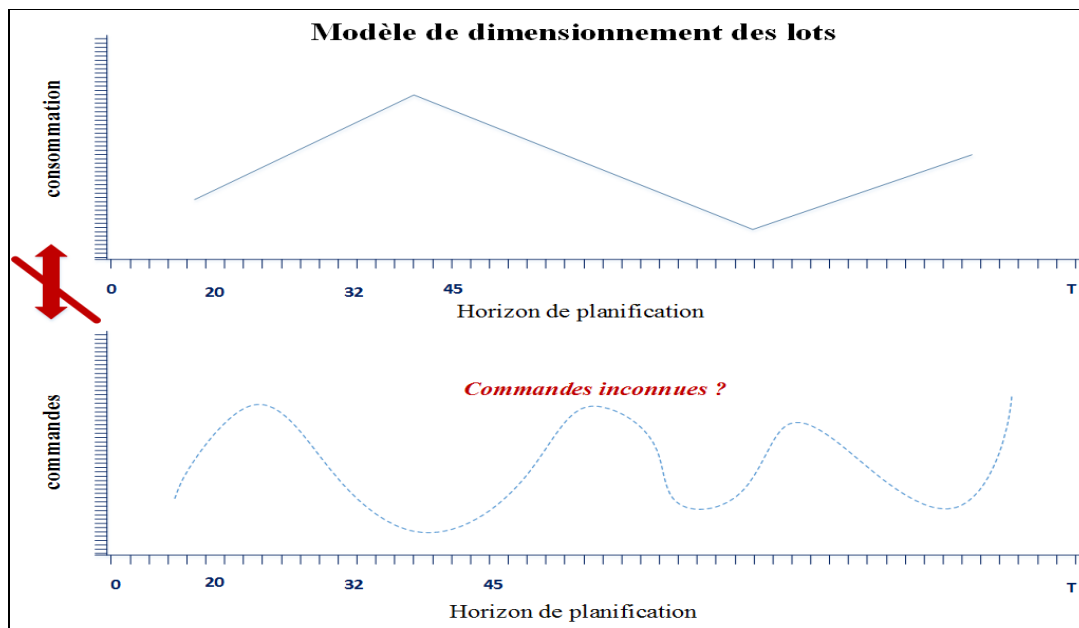


Figure 4.2 Représentation du problème de dimensionnement des lots.

4.2 Modèle mathématique

Le modèle d'optimisation présenté dans ce chapitre permet de déterminer la quantité de chaque produit livré par le mode aérien, LCL et FCL, le niveau de stock de chaque produit à

chaque client, le nombre de conteneurs utilisé pour livrer les produits de chaque fournisseur à chaque client en absence de collaboration, le nombre de conteneurs utilisés pour livrer les clients de chaque fournisseur dans le cas de la consolidation et la taille du lot à commander de chaque produit à chaque client à chaque période. La fonction objectif et les contraintes sont formulées en un modèle mathématique linéaire en nombres mixtes (MILP).

4.2.1 Ensembles et indices

$p \in P$: Produits.

$i \in F$: Fournisseurs.

$j \in C$: Clients.

$t \in T$: Périodes.

4.2.2 Paramètres du modèle mathématique

Les paramètres du modèle mathématique de la collaboration horizontale et verticale sont :

d_{pjt} : Demande du produit $p \in P$ (en Kg) du client $j \in C$ à la période $t \in T$.

q_{pjt} : Consommation du produit $p \in P$ du client $j \in C$ à la période $t \in T$ (kg).

q_{pjt}^{\min} : Demande minimum à satisfaire (kg) du produit $p \in P$ du client $j \in C$ à la période $t \in T$.

h_{pj} : Coût de stockage du produit $p \in P$ au client $j \in C$.

a_{pi} : Coût variable d'utilisation d'un conteneur consolidé pour le produit $p \in P$ (\$/Conteneur) du fournisseur $i \in F$. (Il est calculé par la somme du coût d'utilisation du conteneur et le coût additionnel de séparation des livraisons).

b : Coût fixe d'utilisation d'un conteneur (\$/conteneur).

c_{pij}^f : Coût variable de transport par le mode maritime (FCL) (\$/m³) du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.

- c_{pij}^l : Coût variable de transport par le mode maritime (LCL) du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ (\$/m³).
- c_{pij}^a : Coût de transport par le mode aérien du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ (\$/kg).
- v : Capacité volumique du conteneur (m³).
- s : Capacité massique du conteneur (kg).
- w_p : Densité du produit $p \in P$ (Kg/m³).
- l_{ij}^m : Délai de livraison du mode de transport maritime du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.
- l_{ij}^a : Délai de livraison du mode de transport aérien du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.
- s_{pj}^{st} : Quantité minimale du produit $p \in P$ au client $j \in C$.
- t_p^{axe} : Taxe sur le produit $p \in P$.
- d_p^{roit} : Droit de douane sur le produit $p \in P$.
- M : ‘Grand M’ très grand nombre calculé par la somme de la demande totale sur toutes les périodes ($M = \sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} d_{pjt}$).
- M' : ‘Grand M’ très grand nombre calculé par le nombre maximum de conteneurs qui peut être utilisé ($M' = \sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} d_{pjt} / s$).
- h_{pj} : Coût de stockage du produit $p \in P$ au client $j \in C$.
- a_{pi} : Coût variable d’utilisation d’un conteneur consolidé pour le produit $p \in P$ (\$/Conteneur) du fournisseur $i \in F$. (Il est calculé par la somme du coût d’utilisation du conteneur et le coût additionnel de séparation des livraisons).
- b : Coût fixe d’utilisation d’un conteneur (\$/conteneur).
- c_{pij}^f : Coût variable de transport par le mode maritime (FCL) (\$/m³) du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.

- c_{pij}^l : Coût variable de transport par le mode maritime (LCL) du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ (\$/m³).
- c_{pij}^a : Coût de transport par le mode aérien du produit $p \in P$ du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ (\$/kg).
- v : Capacité volumique du conteneur (m³).
- s : Capacité massique du conteneur (kg).
- w_p : Densité du produit $p \in P$ (Kg/m³).
- l_{ij}^m : Délai de livraison du mode de transport maritime du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.
- l_{ij}^a : Délai de livraison du mode de transport aérien du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$.
- s_{pj}^{st} : Quantité minimale du produit $p \in P$ au client $j \in C$.
- t_p^{axe} : Taxe sur le produit $p \in P$.
- d_p^{roit} : Droit de douane sur le produit $p \in P$.
- M : ‘Grand M’ très grand nombre calculé par la somme de la demande totale sur toutes les périodes ($M = \sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} d_{pjt}$).
- M' : ‘Grand M’ très grand nombre calculé par le nombre maximum de conteneurs qui peut être utilisé ($M' = \sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} d_{pjt} / s$).

4.2.3 Variables de décision du modèle mathématique

Les variables de décision du modèle mathématique de la collaboration horizontale et verticale sont :

- R_{pjt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg) commandé par le client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- A_{pijt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg) livrée par le mode de transport aérien du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- L_{pijt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg) livrée par le mode maritime *Less than Container Load* (LCL) du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- F_{pijt} : Quantité du produit $p \in P$ (kg) livrée par le mode de transport maritime *Full Container Load* (FCL) du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- I_{pjt} : Niveau du stock du produit $p \in P$ (kg) au client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- N_{ijt} : Nombre de conteneurs classiques utilisés (unités) du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$ à la période $t \in T$.
- Y_{it} : Nombre de conteneurs consolidés utilisés (unités) par le fournisseur $i \in F$ à la période $t \in T$.
- G_{pij} : Variable binaire égale à 1 si le produit $p \in P$ est livré du fournisseur $i \in F$ au client $j \in C$, 0 sinon

4.2.4 Fonction objectif du modèle mathématique

La fonction-objectif est formulée dans l'équation (4.1).

Min $Z =$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} h_{pj} I_{pjt}}_{(1)} + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{t \in T} a_{pi} Y_{it}}_{(2)} + \underbrace{\sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} b N_{ijt}}_{(3)} \\
& + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} (c_{pij}^f (F_{pijt} / w_p) + c_{pij}^l (L_{pijt} / w_p))}_{(4)} + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} (h_{pj} l_{ij}^m F_{pijt} + h_{pj} l_{ij}^m L_{pijt})}_{(5)} \\
& + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} (c_{pij}^a + h_{pj} l_{ij}^a) A_{pijt}}_{(6)} + \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{i \in F} \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} (t_p^{axe} + d_p^{roit}) (A_{pijt} + L_{pijt} + F_{pijt})}_{(7)}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Dans l'équation (4.1), le premier terme (1) exprime le coût total de stockage des produits durant l'horizon de planification. Le deuxième terme (2) représente le coût total d'utilisation des conteneurs consolidés par les fournisseurs. Le troisième terme (3) exprime le coût total des conteneurs classiques utilisés pour livrer les produits des fournisseurs aux clients. Le quatrième terme (4) est le coût total du transport maritime qui est la somme des coûts de transport par le mode FCL et LCL. Le cinquième terme (5) exprime le coût de transit maritime de tous les produits. Le sixième terme (6) est le coût total de transport aérien. Enfin, le septième terme (7) représente les taxes et les droits de douane respectivement appliqués sur les produits durant le transport international.

4.2.5 Contraintes du modèle mathématique

L'équation (1) est sujette aux *contraintes* :

$$I_{pjt} = I_{pjt-1} + R_{pjt} - q_{pjt} \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (4.2)$$

$$R_{pjt} = \sum_{i \in F} F_{pijt-l_{ij}^m} + \sum_{i \in F} L_{pijt-l_{ij}^m} + \sum_{i \in F} A_{pijt-l_{ij}^a} \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (4.3)$$

$$\sum_{t \in T} R_{pjt} \geq d_{pj} \quad \forall p \in P, j \in C \quad (4.4)$$

$$R_{pjt} \geq q_{pjt}^{\min} \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (4.5)$$

$$I_{pjt} \geq s_{pj}^{st} \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (4.6)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} (L_{pijt} / w_p) \leq v \quad \forall t \in T, i \in F \quad (4.7)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} (F_{pijt} / w_p) \leq v Y_{it} + M \sum_{j \in C} N_{ijt} \quad \forall t \in T, i \in F \quad (4.8)$$

$$\sum_{p \in P} (F_{pijt} / w_p) \leq v N_{ijt} + M Y_{it} \quad \forall t \in T, i \in F, j \in C \quad (4.9)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} L_{pijt} \leq s \quad \forall t \in T, i \in F \quad (4.10)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in C} F_{pijt} \leq s Y_{it} + M \sum_{j \in C} N_{ijt} \quad \forall t \in T, i \in F \quad (4.11)$$

$$\sum_{p \in P} F_{pijt} \leq sN_{ijt} + MY_{it} \quad \forall t \in T, i \in F, j \in C \quad (4.12)$$

$$Y_{it} \leq M'(1 - \sum_{j \in C} N_{ijt}) \quad \forall i \in F, t \in T \quad (4.13)$$

$$N_{ijt} \leq M'(1 - Y_{it}) \quad \forall i \in F, j \in C, t \in T \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in F} G_{pij} = 1 \quad \forall p \in P, j \in C \quad (4.15)$$

$$\sum_{t \in T} A_{pijt} \leq MG_{pij} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (4.16)$$

$$\sum_{t \in T} L_{pijt} \leq MG_{pij} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (4.17)$$

$$\sum_{t \in T} F_{pijt} \leq MG_{pij} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (4.18)$$

$$A_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C, t \in T \quad (4.19)$$

$$L_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C, t \in T \quad (4.20)$$

$$F_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C, t \in T \quad (4.21)$$

$$R_{pijt} \geq 0 \quad \forall p \in P, j \in C, t \in T \quad (4.22)$$

$$N_{ijt} \geq 0, \text{entier} \quad \forall i \in F, j \in C, t \in T \quad (4.23)$$

$$Y_{it} \geq 0, \text{entier} \quad \forall i \in F, t \in T \quad (4.24)$$

$$G_{pij} \text{ binaire} \quad \forall p \in P, i \in F, j \in C \quad (4.25)$$

La contrainte (4.2) assure l'équilibre des flux dans le système. Pour chaque produit, chaque client et chaque période de temps, le stock à la période (t) est égal à la différence entre la somme du stock de la période (t-1), la taille du lot à commander à la période t et la consommation des clients. La contrainte (4.3) assure que la quantité de produits transportés par le mode maritime et aérien à la période (t-délai de livraison) soit égale à la taille du lot commandé.

La contrainte (4.4) assure que la somme des lots commandés satisfasse la demande globale exprimée par le client. La contrainte (4.5) assure que le niveau de stock est supérieur au stock

de sécurité. La contrainte (4.6) permet de garder la taille du lot supérieure à la demande minimale à satisfaire.

Les contraintes (4.7) et (4.10) assurent que le volume et le poids maximaux sont respectés respectivement pour le LCL. Les contraintes (4.8) (4.9) (4.11) et (4.12) assurent que le volume et le poids maximaux sont respectés respectivement pour le FCL.

Les contraintes (4.13) et (4.14) reflètent le choix de la consolidation des livraisons de telle sorte que si le modèle choisit de consolider, il ne peut pas affecter un conteneur pour un seul client et vice versa. Si le fournisseur choisi d'envoyer un conteneur pour chacun de ses clients la variable de décision qui donne le nombre de conteneurs consolidés est nulle. Si le fournisseur choisi d'envoyer un conteneur consolidé à tous ses clients, la variable de décision qui donne le nombre de conteneurs non consolidés est nulle.

La contrainte (4.15) assure que pour une demande d'un produit d'un client, un seul fournisseur est sélectionné pour le produit sur tout l'horizon de planification. Les contraintes (4.16) (4.17) et (4.18) expriment le fait que si le fournisseur n'est pas choisi, toutes les quantités relatives à ce fournisseur sont nulles.

Les contraintes (4.19) (4.20) (4.21) et (4.22) sont les contraintes de positivité des variables de décision. Les contraintes (4.23) et (4.24) assurent que le nombre de conteneurs est un entier. Enfin, la contrainte (4.25) qui assurent que la variable de décision G_{pij} est binaire.

4.3 Étude de cas

Dans cette section, nous présentons une étude de cas pour analyser la performance du modèle proposé. L'objectif principal est de déterminer l'impact de la collaboration horizontale et verticale sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale.

4.3.1 Collecte de données

Le tableau 4.1 indique les paramètres utilisés dans cette étude de cas. Ces valeurs ont été prises d'un cas industriel traité par (Bhatnagar, Mehta et Chong Teo, 2011).

Tableau 4.1 Paramètres utilisés dans le cas de dimensionnement des lots

Taille de l'horizon de planification	50 semaines
Ration de coût de la livraison aérienne/ livraison maritime	6:1
Stock de sécurité	0
Délai de livraison aérien	1 semaine
Délai de livraison maritime	4 semaines
Poids du conteneur	28250 kg
Volume du conteneur	33 m ³

4.3.2 Scénario de base

L'objectif de ce scénario de base est de déterminer la taille du lot à commander par chaque client à chaque période afin de satisfaire la demande globale du client sur une année. La gestion des stocks est donc mise en avant plan. Pour cela, le modèle MILP a été implémenté sur CPLEX et plusieurs scénarios ont été simulés.

4.3.2.1 Configuration de base

La collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs du réseau est représentée par le dimensionnement des lots à commander pour chaque période afin de synchroniser les livraisons et les commandes entre les clients et les fournisseurs.

Pour analyser l'impact du dimensionnement des lots sur la gestion de la CAI, deux scénarios ont été réalisés. Le premier scénario représente le cas où la demande est égale à la consommation des clients. Le deuxième scénario représente le cas où la consommation des clients est connue et le dimensionnement des lots est appliqué (Figure 4.3).

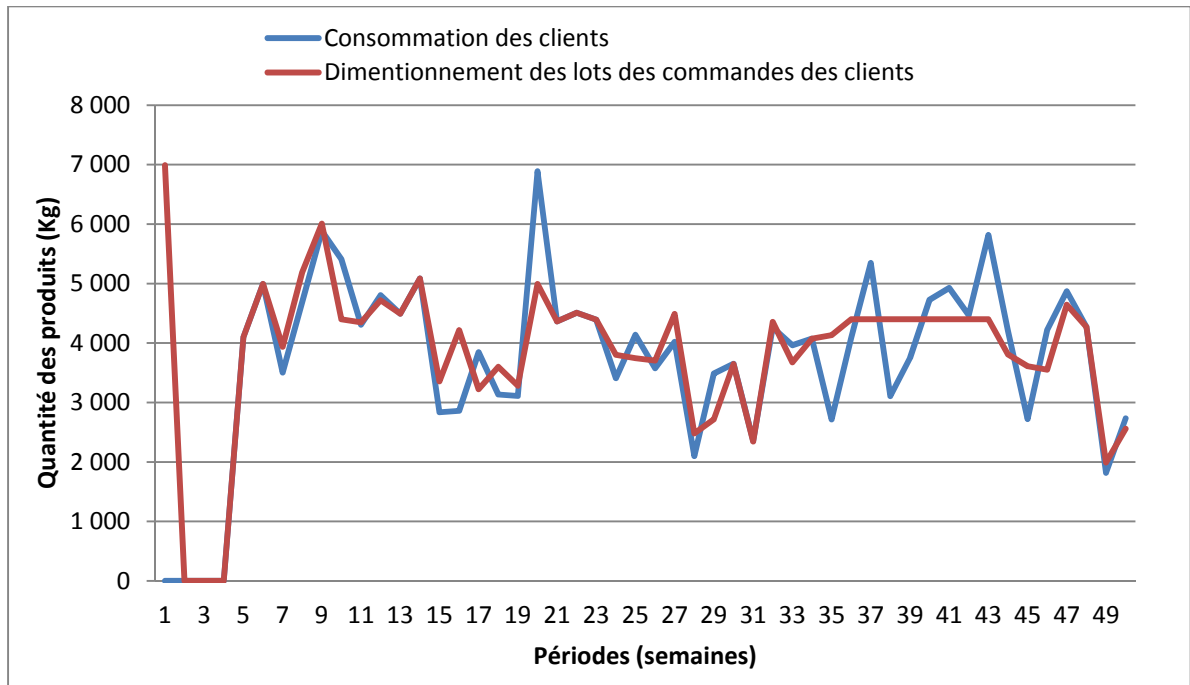


Figure 4.3 Configuration de dimensionnement des lots: variation des lots à commander sur l'horizon de planification

Dans le premier scénario (sans le dimensionnement des lots), le coût total s'élève à 90130225 \$ et dans le deuxième scénario (avec le dimensionnement des lots), le coût total s'élève à 12724720 \$ (Tableau 4.2). Ainsi, le dimensionnement des lots commandés par les clients induit une diminution du coût total. Le résultat du dimensionnement des lots est donné par un vecteur de taille 50 pour chaque produit de chaque client. Un extrait des résultats est présenté dans le tableau 4.3.

Tableau 4.2 Résultats de la configuration de base du dimensionnement des lots

Répartition des coûts	Scénario 1	Scénario 2
Fonction objectif	90 130 225 \$	12 724 720 \$
Coût de transport	90 129 755 \$	12 724 250 \$

Tableau 4.3 Résultats du dimensionnement des lots

Taille des lots à commander (kg)									
Périodes (semaines)	...	20	21	22	23	24	25	26	...
P1 C1	...	1 922	229	1 176	1 892	1 336	46	433	...
P1 C2	...	718	1 024	1.427	217	706	438	515	...
P2 C1	...	594	1 981	124	1 520	43	1 664	1 972	...
P2 C2	...	1 760	1 129	1 183	765	1 129	1 598	784	...

4.3.2.2 Configuration de la collaboration horizontale et verticale

Pour analyser l'impact de la collaboration horizontale et verticale sur le dimensionnement des lots à commander, deux scénarios ont été réalisés. Le premier scénario est la configuration classique sans l'aspect de collaboration et de consolidation. Le deuxième scénario est la configuration avec consolidation des livraisons des clients. La variation des stocks est analysée à travers l'horizon de planification.

Pour le premier scénario (sans consolidation), les commandes des clients sont placées périodiquement. Donc, les commandes de chaque client sur plusieurs périodes sont rassemblées à une première période (Figure 4.4). Par exemple, les commandes des périodes 1 à 6 ont été placées à la période 1.

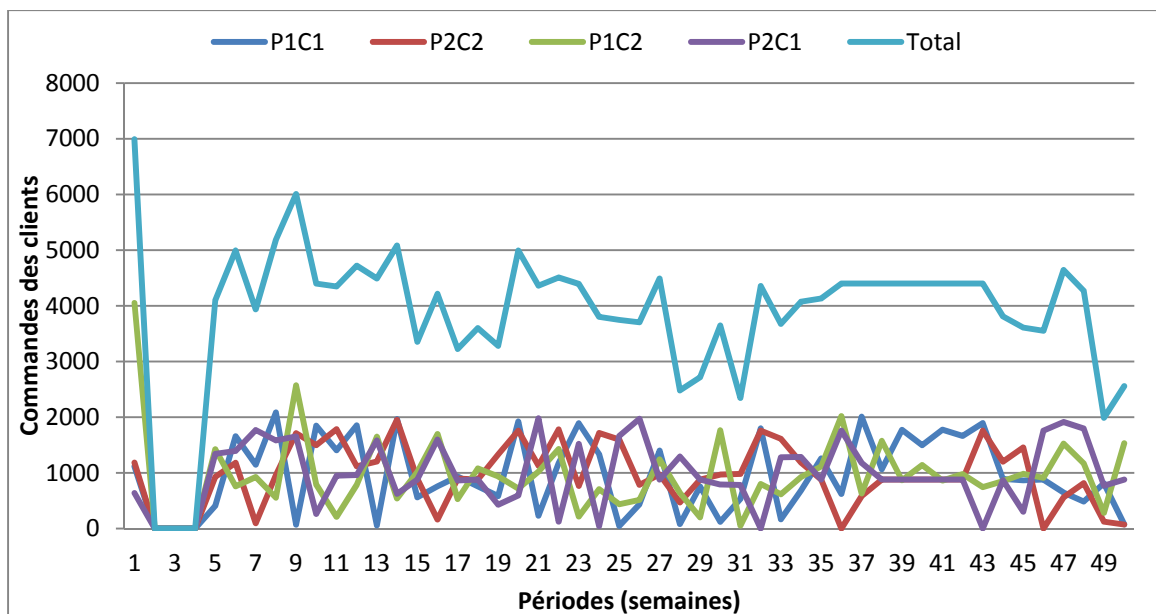


Figure 4.4 Scénario1: Variation des commandes des clients sur l'horizon de planification.

Le niveau des stocks des produits varie aussi périodiquement (Figure 4.5). Par exemple, à la période 8, le niveau des stocks est de 1000Kg, à la période 11, le niveau des stocks est de 85Kg. Le niveau total des stocks sur l'horizon de planification est de 32 762 kg.

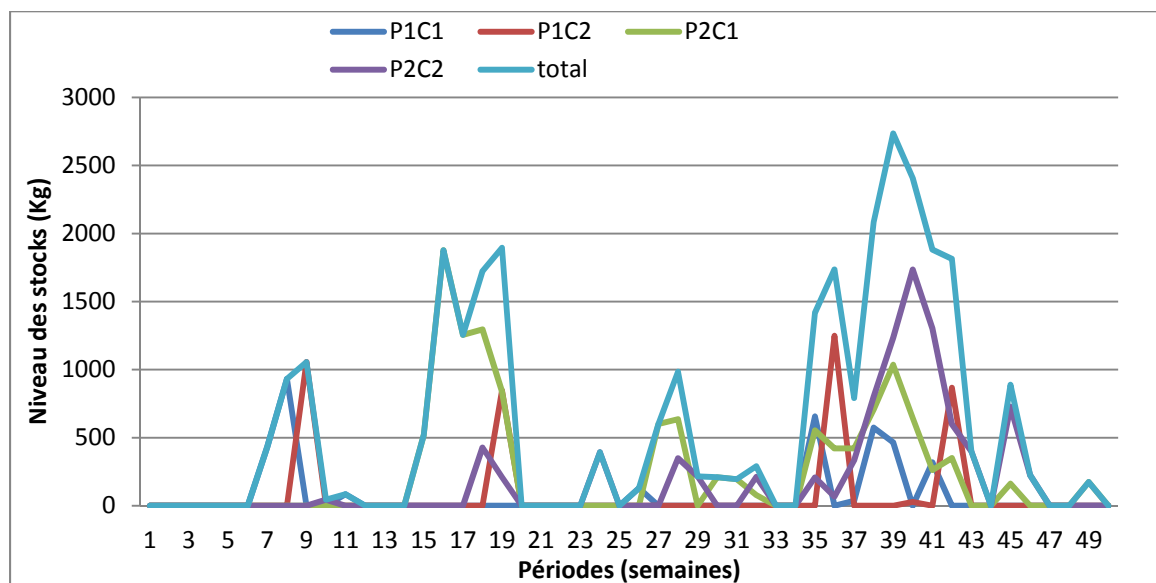


Figure 4.5 Scénario 1: Variation du niveau des stocks sur l'horizon de planification.

Pour le deuxième scénario (avec collaboration), les commandes des clients sont placées moins périodiquement que dans le scénario 1. Ceci est expliqué par le fait que dans ce cas les commandes du client sont combinées avec d'autres commandes d'autres clients. Donc, le client ne peut pas placer un ordre pour couvrir une longue période de planification (Figure 4.6). Par exemple, les commandes des périodes 1 et 4 sont placées à la période 1.

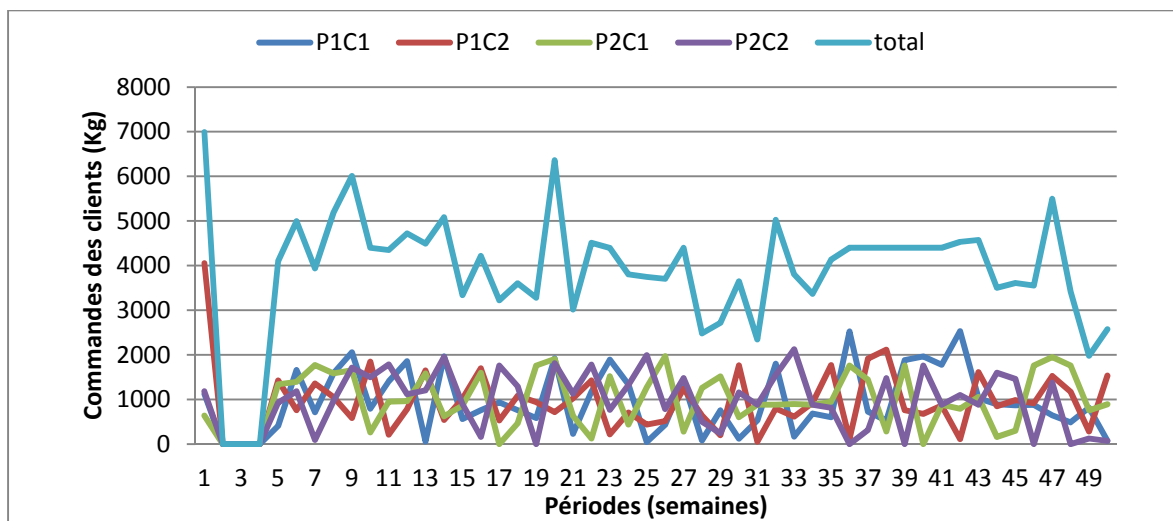


Figure 4.6 Scénario 2: Variation des commandes des clients à travers l'horizon de planification.

Le niveau des stocks est moins important que dans le premier scénario. Le niveau total des stocks sur tout l'horizon de planification est de 29 388 kg. Cela dit, les stocks varient de façon périodique (Figure 4.7). Ainsi, dans le cas de la collaboration, la consolidation des commandes des clients diminue le niveau des stocks.

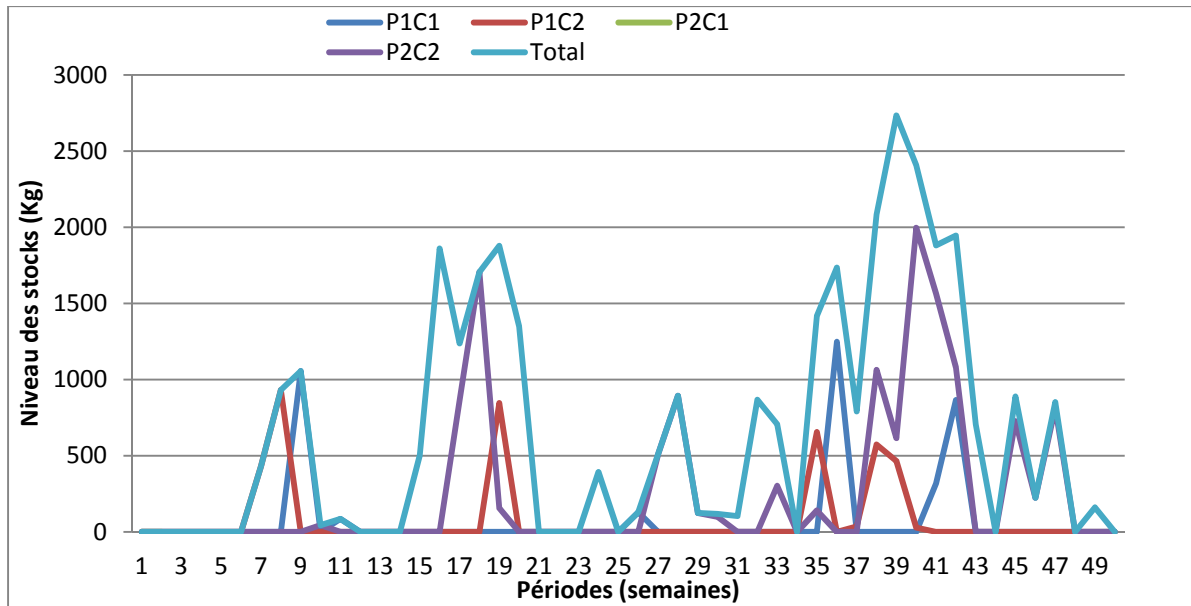


Figure 4.7 Scénario 2 : Variation du niveau des stocks à travers l'horizon de planification.

4.3.3 Impact de la collaboration horizontale et verticale sur la GCAI

Pour mieux analyser l'impact de la collaboration horizontale et verticale sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale, une analyse comparative entre la configuration de base (sans collaboration), la configuration de la collaboration horizontale (entre les clients) et la configuration de la collaboration horizontale et verticale (entre les clients et les fournisseurs) est présentée dans le tableau suivant. Nous avons pris une configuration caractérisée par une demande $\sim U(35, 2500)$.

Tableau 4.4 Tableau comparatif des résultats des trois configurations de collaboration

Modèle	Sans collaboration	Avec collaboration horizontale	Avec collaboration horizontale et verticale
Coût total	28 583 174 \$	27 234 632 \$	27 119 661 \$
Nombre de conteneur consolidé (conteneur)	0	20	90
Niveau des stocks (kg)	59 609	4 195	4 195

De cette analyse, il en sort que la collaboration entre les acteurs de la chaîne d’approvisionnement internationale permet de minimiser le coût total de la chaîne d’approvisionnement internationale. De plus, la collaboration horizontale et verticale permet d’une part de diminuer le niveau des stocks et d’une autre part d’augmenter l’utilisation des conteneurs consolidés. Ainsi, une communication transparente entre les acteurs de la chaîne d’approvisionnement internationale permet d’échanger les informations exactes sur les types de produits, les quantités à livrer et les capacités. Cet échange qui se fait entre les clients et les fournisseurs amène une planification plus efficace des livraisons des produits aux clients.

4.4 Analyse de sensibilité

4.4.1 Variation du coût unitaire de stockage

Dans cette section, le coût unitaire de stockage est varié afin d’observer la variation du niveau des stocks. Plus le coût unitaire de stockage augmente plus le niveau total des stocks augmente (Figure 4.8). Ceci est expliqué par le fait qu’afin de minimiser le coût total, le client stocke moins quand le coût de stockage est élevé. Ceci démontre que l’augmentation du coût unitaire de stockage induit la diminution de niveau des stocks.

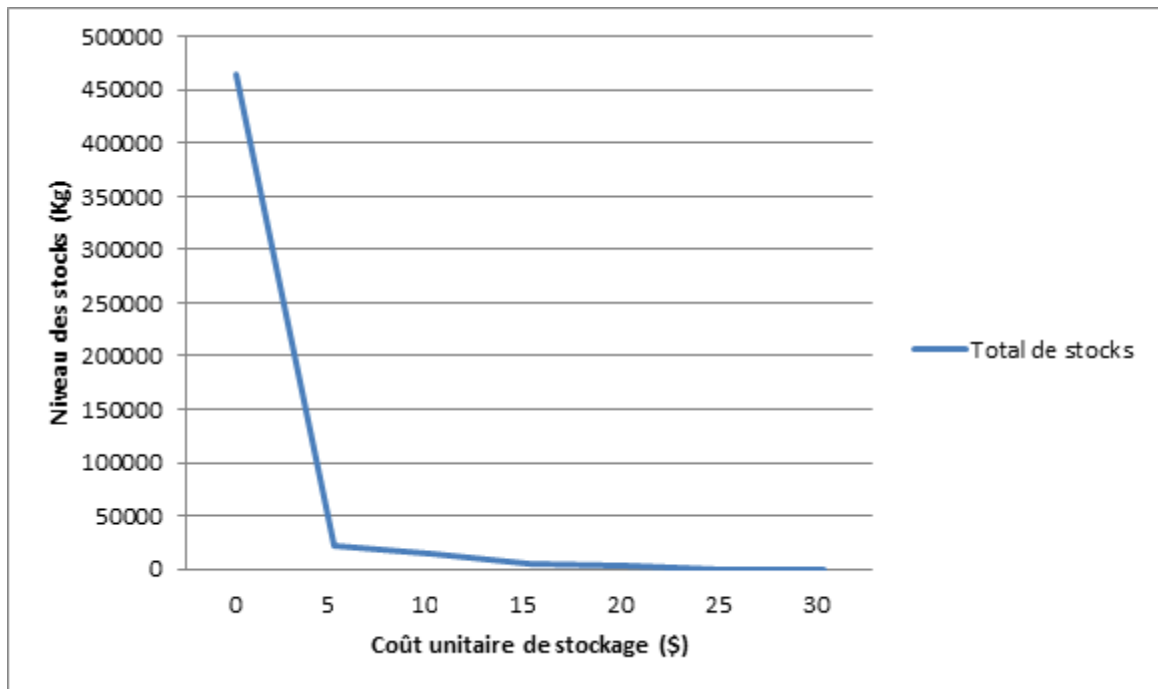


Figure 4.8 Variation du niveau des stocks en fonction du coût unitaire de stockage

4.4.2 Variation du rapport de densité des produits dans le cas de la collaboration horizontale et verticale

Dans cette section, nous étudions l'impact de la densité des produits sur la consolidation des livraisons dans le cas de la collaboration horizontale et verticale. Nous avons pris une configuration caractérisée par une demande $\sim U(35, 2500)$. Nous avons roulé le modèle avec différents ratios de densité des produits. Nous avons noté ce ratio α . Le ratio varie de 1 à 50 avec un pas de 5. La figure 4.9 démontre les résultats obtenus.

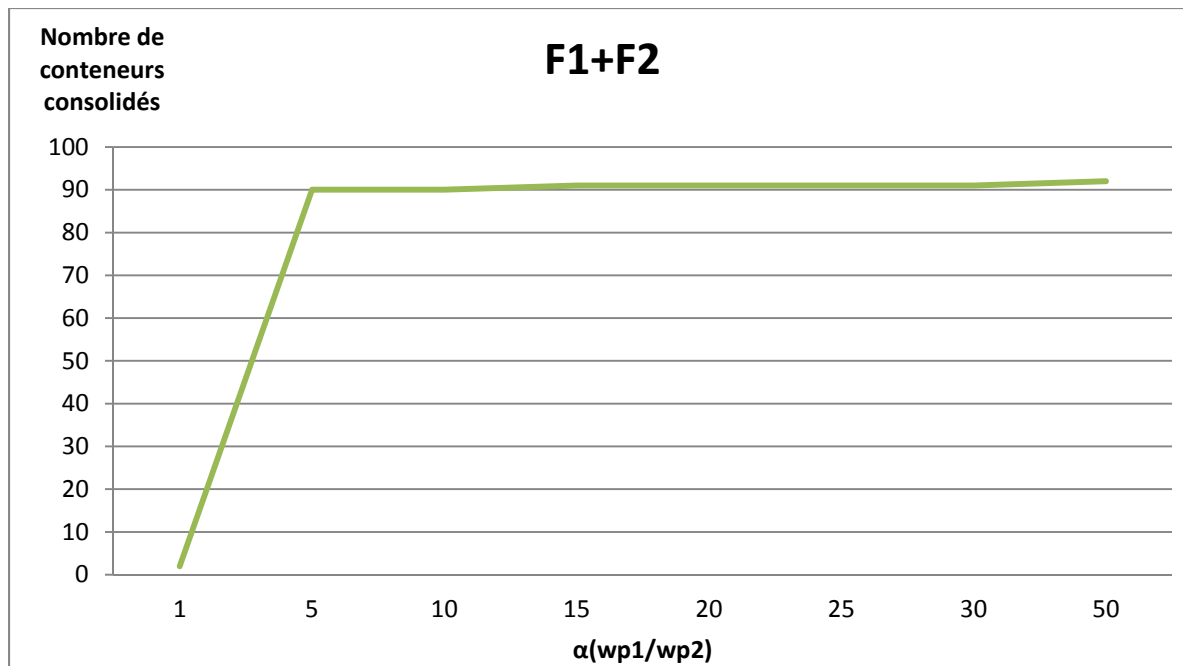


Figure 4.9 Variation de la consolidation des livraisons en fonction de la densité des produits dans le cas de la collaboration horizontale et verticale

D'après ces résultats, la consolidation des livraisons est plus présente quand le ratio α est plus grand car si α est grand alors la densité du premier produit est plus importante que la densité du deuxième produit. Ainsi, le premier produit prend beaucoup de poids et le deuxième produit prend beaucoup de volume. C'est pour cela que plus α est grand plus la consolidation des livraisons dans le cas de la collaboration horizontale et verticale est favorable.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons répondu à la deuxième question de recherche : « *Quel est l'impact de la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs du réseau sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale* » ?

Dans cette partie, les commandes des clients ont été déterminées en collaborant avec les fournisseurs. L'échange d'information entre les clients et les fournisseurs a permis de

synchroniser les commandes des clients et les livraisons des fournisseurs afin de minimiser les coûts de la chaîne d'approvisionnement internationale.

Nous avons présenté un modèle mathématique linéaire en nombres mixtes implémenté sur *CPLEX* qui présente la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs par la consolidation des livraisons en un seul conteneur et le dimensionnement des lots à commander. Nous avons simulé plusieurs scénarios et configurations et nous avons déduit que la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs de la chaîne d'approvisionnement :

- 1- diminue les coûts de transport de la chaîne d'approvisionnement internationale.
- 2- diminue le niveau des stocks.
- 3- devient plus favorable avec l'augmentation du rapport de densité entre les produits à livrer.

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons analysé l'impact de la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale. Nous avons considéré un réseau de chaîne d'approvisionnement internationale avec des fournisseurs, clients, produits et un horizon de planification multi-période. Nous avons aussi considéré deux modes de transport : 1) le mode aérien et 2) le mode maritime.

Pour chaque période de temps, nous avons déterminé la quantité de produits à livrer du fournisseur au client avec le mode de transport le plus adéquat afin de satisfaire la demande finale des clients au bon moment et à un coût total minimal. De plus, nous avons considéré toutes les taxes et les droits de douane relatifs au transport international.

Nous avons aussi considéré deux types de conteneurs : conteneur non consolidé et conteneur consolidé. Les conteneurs consolidés traduisent la collaboration entre les clients. Le fournisseur livre un conteneur consolidé pour tous ses clients au lieu d'un conteneur non consolidé pour chaque client. Pour illustrer ces idées, un modèle linéaire en nombres mixtes (MILP) a été présenté pour analyser l'impact de la collaboration sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement internationale.

Après avoir simulé plusieurs scénarios et configurations, nous avons déduit que le choix du mode de transport dépend des quantités à livrer aux clients. Le mode aérien est rarement utilisé à cause de son coût élevé. Le mode maritime est généralement utilisé, car il est moins coûteux que le mode aérien. Dans le mode maritime, le LCL est utilisé pour les petites quantités et le FCL est utilisé pour les grandes quantités à livrer.

Dépendamment du choix des fournisseurs, la consolidation est favorisée lorsque différents clients sont affectés au même fournisseur. Ainsi, le fournisseur peut utiliser un conteneur consolidé pour livrer ses clients. La consolidation des livraisons dépend aussi de la densité des produits. La relation entre le poids et le volume est importante, car l'objectif est de

déterminer la meilleure combinaison pour exploiter toute la capacité des conteneurs consolidés. Le fournisseur doit donc combiner les produits qui sont lourds et n'occupent pas d'espace avec des produits qui sont légers et plus volumineux afin d'optimiser ou éliminer le fait que les conteneurs voyagent à moitié vides.

De plus nous, avons analysé l'impact de la collaboration horizontale et verticale entre les clients et les fournisseurs en considérant le problème de dimensionnement des lots dans la chaîne d'approvisionnement internationale. Après l'exécution de plusieurs scénarios et configurations, nous en avons déduit que, dans le cas d'une collaboration, la combinaison des commandes des clients induit une diminution du niveau des stocks.

Le transport collaboratif entre les clients permet aux fournisseurs de consolider leurs livraisons. Ils utilisent moins de conteneurs et donc minimisent les émissions de gaz à effet de serre dû au transport pour protéger l'environnement. De plus, les fournisseurs minimisent l'espace et le temps en consolidant leurs livraisons et deviennent plus efficaces. Cette efficacité impacte sur tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement et assure un meilleur environnement de travail pour tous les employés de la chaîne d'approvisionnement.

RECOMMANDATIONS

Ainsi, ce travail peut être étendu dans plusieurs directions. La première extension peut être l'aspect environnemental. Dans le modèle mathématique, il est possible d'introduire des variables de décision relatives aux émissions de gaz à effet de serre pour analyser l'impact des émissions de carbone sur la collaboration.

La seconde extension peut être l'aspect sociétal. Afin d'atteindre la durabilité, il est important de considérer l'aspect sociétal dans la prise de décision. Ceci en analysant le comportement des employés pour déterminer la meilleure façon d'améliorer leurs conditions de travail.

La troisième extension peut être l'introduction de la théorie des tournées de véhicules pour détailler le processus de livraisons des entrepôts de séparation aux clients. Ceci pourrait raffiner la fonction coût en introduisant tous les coûts spécifiques de livraison. Il est possible aussi de détailler la formule de calcul des stocks ce qui permettra de réaliser une étude plus approfondie concernant la variation et la gestion des stocks.

De plus, dans ce travail, le risque au niveau des délais de livraison et du délai de dédouanement n'a pas été introduit. Il est donc possible de faire une analyse de risque afin de rendre le modèle réalisé plus fidèle à la réalité. Il est possible aussi de détailler les taxes et les droits de douane selon le type de produit livré. Ceci permettra d'avoir un coût total plus exact.

Dans le transport international, il existe des contraintes spécifiques à certains types de marchandise qui nécessitent un traitement spécial. Une amélioration du modèle peut être la considération des différents types de produits pour pouvoir distinguer les contraintes spécifiques à chaque produit. Il est possible aussi d'introduire les différents types de

conteneurs maritimes et aériens avec toutes leurs contraintes de poids et de volume et le choix du type de conteneur le plus adéquat.

De plus, afin de mieux répartir les coûts de transport sur les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement internationale, il est possible de rajouter les différents incoterms. Ces derniers déterminent la responsabilité de chaque acteur sur les tâches du processus de transport. Une autre extension est la réalisation d'une évaluation financière de la chaîne d'approvisionnement internationale. Ceci en introduisant les variations du taux de change vu que réellement les coûts de transport changent à chaque période de temps.

Dans ce travail, les clients sont censés collaborer en mettant de côté la contrainte de confiance. Il est donc possible d'introduire l'aspect de concurrence dans la problématique et résoudre le problème en utilisant la théorie des jeux par exemple. Il est possible aussi d'introduire la collaboration mixte qui engage tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement internationale, des fournisseurs, transporteurs, douane, aux clients. L'idéal, ça serait que tous ces acteurs partagent leurs informations sur les capacités la consommation et toute information pertinente en toute transparence pour pouvoir trouver la solution la plus durable.

Une autre extension peut être l'utilisation du concept des π -conteneurs et de l'internet physique pour voir comment le réseau de la chaîne d'approvisionnement internationale peut atteindre les challenges de la durabilité.

Une autre extension peut être l'application de l'approche six sigmas pour améliorer l'efficacité et la qualité du processus de transport. Ceci permettra d'avoir une approche plus efficace pour la gestion du transport.

Et enfin, la dernière extension sera la maximisation des profits au lieu de minimiser les coûts. Ceci permet de trouver une meilleure solution optimale grâce à un modèle d'optimisation qui aura tendance à maximiser les profits des concernés et non pas essayer de minimiser les coûts.

ANNEXE I

COÛT À L'EXPORTATION DES CONTENEURS (US \$ par conteneur)

Les coûts mesurent les frais associés à un conteneur de 20 pieds en dollars américains. Tous les frais associés aux procédures d'exportation ou d'importation de biens sont inclus. Cela comprend les coûts des documents, les frais administratifs de douanes et les contrôles techniques, les frais de courtage en douanes, les frais de manutention des marchandises dans le terminal et le transport terrestre. Les coûts ne comprennent pas les droits de douane ou les taxes commerciales. Seuls les coûts officiels sont pris en compte. Plusieurs hypothèses sont émises pour l'entreprise sondée : elle a 60 employés ou plus ; elle est située dans la ville la plus peuplée du pays et il s'agit d'une société privée à responsabilité limitée. Elle n'opère pas depuis une zone de traitement des exportations ou une zone industrielle avec des privilèges spéciaux d'importation ou d'exportation. Elle est détenue par des intérêts locaux et sans participation étrangère. Elle exporte plus de 10 % de ses ventes. Hypothèses relatives aux biens échangés : les produits échangés sont transportés dans un conteneur de 20 pieds de charge sèche plein. Les produits : ne sont pas des matières dangereuses et ne comprennent pas d'articles militaires ne nécessitent pas de réfrigération ni d'autre environnement spécial et ne nécessitent pas de normes de sécurité phytosanitaire ou environnementale spéciales autres que les normes internationales reconnues.

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
Afghanistan	3 545\$	3 545\$	3 545\$	4 645\$	5 045\$
Afrique du Sud	1 531\$	1 531\$	1 620\$	1 705\$	1 830\$
Albanie	725\$	745\$	745\$	745\$	745\$
Algérie	1 248\$	1 248\$	1 260\$	1 270\$	1 270\$
Allemagne	902\$	902\$	902\$	905\$	1 015\$
Andorre					
Angola	2 050\$	2 050\$	2 050\$	2 060\$	2 060\$
Antigua-et-Barbuda	1 021\$	1 090\$	1 090\$	1 090\$	1 090\$
Arabie saoudite	765\$	765\$	935\$	1 055\$	1 285\$
Argentine	1 480\$	1 480\$	1 650\$	1 650\$	1 770\$

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
Arménie	1 735\$	1 885\$	1 885\$	1 885\$	1 885\$
Aruba					
Australie	1 060\$	1 060\$	1 100\$	1 150\$	1 200\$
Autriche	1 180\$	1 180\$	1 090\$	1 090\$	1 150\$
Azerbaïdjan	3 420\$	3 345\$	3 430\$	3 540\$	3 460\$
Bahamas	1 005\$	1 005\$	1 005\$	1 005\$	1 005\$
Bahreïn	810\$	810\$	810\$	810\$	810\$
Bangladesh	1 070\$	1 115\$	1 175\$	1 203\$	1 281\$
Barbade		810\$	810\$	810\$	810\$
Bélarus	1 772\$	2 160\$	1 460\$	1 460\$	1 460\$
Belgique	1 240\$	1 240\$	1 240\$	1 240\$	1 240\$
Belize	1 355\$	1 355\$	1 355\$	1 355\$	1 355\$
Bénin	1 071\$	1 071\$	1 101\$	1 052\$	1 052\$
Bermudes					
Bhoutan	2 230\$	2 230\$	2 230\$	2 230\$	2 230\$
Bolivie	1 425\$	1 425\$	1 425\$	1 440\$	1 440\$
Bosnie-Herzégovine	1 260\$	1 260\$	1 260\$	1 260\$	1 260\$
Botswana	2 770\$	2 945\$	2 945\$	3 045\$	3 145\$
Brésil	1 650\$	2 075\$	2 075\$	2 414\$	2 323\$
Brunéi Darussalam	630\$	680\$	680\$	705\$	705\$
Bulgarie	1 526\$	1 526\$	1 526\$	1 375\$	1 375\$
Burkina Faso	2 412\$	2 412\$	2 412\$	2 455\$	2 305\$
Burundi	2 687\$	2 905\$	2 905\$	2 905\$	2 905\$
Cabo Verde	1 125\$	1 125\$	1 125\$	1 125\$	1 125\$
Cambodge	732\$	732\$	755\$	795\$	795\$
Cameroun	1 379\$	1 379\$	1 379\$	1 379\$	1 379\$
Canada	1 660\$	1 660\$	1 660\$	1 680\$	1 680\$
Chili	745\$	795\$	980\$	980\$	910\$
Chine	500\$	500\$	580\$	823\$	823\$
Chine, RAS de Hong Kong	625\$	575\$	575\$	590\$	590\$
Chypre	815\$	865\$	865\$	865\$	865\$
Cisjordanie et Gaza	1 685\$	1 685\$	1 685\$	1 735\$	1 750\$
Colombie	1 870\$	2 370\$	2 355\$	2 355\$	2 355\$
Comores	1 207\$	1 207\$	1 295\$	1 295\$	1 295\$
Congo, République démocratique du	3 055\$	3 055\$	3 155\$	3 155\$	3 365\$
Congo, République du	3 818\$	3 818\$	3 818\$	3 795\$	3 795\$
Corée, République de	790\$	680\$	665\$	670\$	670\$
Corée, République démocratique de					
Costa Rica	1 160\$	1 160\$	1 000\$	1 020\$	1 020\$

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
Côte d'Ivoire	1 710\$	1 710\$	1 740\$	1 740\$	1 390\$
Croatie	1 281\$	1 300\$	1 300\$	1 335\$	1 335\$
Cuba					
Curacao					
Danemark	794\$	794\$	794\$	795\$	795\$
Djibouti	886\$	886\$	886\$	885\$	885\$
Dominique	947\$	990\$	990\$	990\$	990\$
Égypte, République arabe d'	613\$	613\$	625\$	625\$	625\$
El Salvador	890\$	890\$	1 025\$	1 025\$	1 045\$
Émirats arabes unis	521\$	630\$	630\$	655\$	665\$
Équateur	1 455\$	1 455\$	1 535\$	1 535\$	1 535\$
Érythrée	1 821\$	1 821\$	1 850\$	1 850\$	1 850\$
Espagne	1 271\$	1 271\$	1 310\$	1 310\$	1 310\$
Estonie	745\$	745\$	765\$	765\$	765\$
États-Unis	1 050\$	1 050\$	1 090\$	1 164\$	1 224\$
Éthiopie	2 180\$	2 180\$	2 180\$	2 180\$	2 380\$
Fédération de Russie	2 460\$	2 410\$	2 595\$	2 338\$	2 401\$
Fidji	654\$	655\$	655\$	790\$	790\$
Finlande	590\$	590\$	590\$	615\$	615\$
France	1 285\$	1 335\$	1 335\$	1 335\$	1 335\$
Gabon	1 945\$	1 945\$	1 945\$	2 045\$	2 145\$
Gambie	991\$	991\$	1 030\$	1 040\$	1 040\$
Géorgie	1 329\$	1 355\$	1 355\$	1 355\$	1 355\$
Ghana	815\$	815\$	815\$	875\$	875\$
Grèce	1 078\$	1 078\$	1 040\$	1 040\$	1 040\$
Grenade	1 088\$	1 088\$	1 300\$	1 300\$	1 300\$
Groenland					
Guam					
Guatemala	1 182\$	1 127\$	1 307\$	1 435\$	1 355\$
Guinée	915\$	915\$	915\$	915\$	915\$
Guinée-Bissau	1 545\$	1 448\$	1 448\$	1 448\$	1 448\$
Guinée équatoriale	1 411\$	1 411\$	1 390\$	1 390\$	1 390\$
Guyane	730\$	730\$	730\$	730\$	730\$
Haïti	1 005\$	1 185\$	1 185\$	1 200\$	1 200\$
Honduras	1 193\$	1 242\$	1 342\$	1 345\$	1 450\$
Hongrie	1 015\$	1 015\$	885\$	885\$	885\$
Île de Man					
Îles Caïmans					
Îles Féroé					

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
Îles Marshall	695\$	695\$	695\$	695\$	695\$
Îles Salomon	793\$	800\$	840\$	840\$	840\$
Îles Turques-et-Caïques					
Îles Vierges (EU)					
Inde	1 005\$	1 045\$	1 070\$	1 332\$	1 332\$
Indonésie	644\$	644\$	644\$	595\$	572\$
Iran, République islamique d'	1 090\$	1 275\$	1 470\$	1 470\$	1 350\$
Iraq	3 550\$	3 550\$	3 550\$	3 550\$	3 550\$
Irlande	1 109\$	1 109\$	1 135\$	1 160\$	1 160\$
Islande	1 532\$	1 532\$	1 465\$	1 530\$	1 530\$
Israël	670\$	610\$	620\$	620\$	620\$
Italie	1 295\$	1 295\$	1 195\$	1 195\$	1 195\$
Jamaïque	1 410\$	1 410\$	1 500\$	1 530\$	1 580\$
Japon	905\$	905\$	905\$	829\$	829\$
Jordanie	825\$	825\$	825\$	825\$	825\$
Kazakhstan	3 005\$	3 130\$	4 685\$	4 885\$	5 285\$
Kenya	2 055\$	2 055\$	2 255\$	2 255\$	2 255\$
Kiribati	820\$	870\$	870\$	870\$	870\$
Kosovo	2 230\$	2 270\$	1 775\$	1 775\$	1 695\$
Koweït	1 060\$	1 085\$	1 085\$	1 085\$	1 085\$
Lesotho	1 680\$	1 680\$	1 695\$	1 695\$	1 795\$
Lettonie	600\$	600\$	600\$	600\$	600\$
Liban	1 000\$	1 050\$	1 080\$	1 080\$	1 080\$
Libéria	1 332\$	1 320\$	1 320\$	1 320\$	1 320\$
Libye			1 140\$	1 140\$	1 140\$
Liechtenstein					
Lituanie	870\$	870\$	825\$	750\$	750\$
Luxembourg	1 420\$	1 420\$	1 420\$	1 425\$	1 425\$
Macédoine, ex-République yougoslave de	1 376\$	1 376\$	1 376\$	1 376\$	1 376\$
Madagascar	1 197\$	1 197\$	1 197\$	1 195\$	1 195\$
Malaisie	450\$	450\$	435\$	450\$	525\$
Malawi	1 713\$	1 675\$	2 200\$	2 200\$	2 200\$
Maldives	1 550\$	1 550\$	1 550\$	1 625\$	1 625\$
Mali	2 202\$	2 202\$	2 202\$	2 440\$	2 440\$
Malte		835\$	855\$	855\$	855\$
Mariannes					
Maroc	577\$	577\$	577\$	595\$	595\$
Maurice	737\$	737\$	660\$	675\$	675\$
Mauritanie	1 640\$	1 640\$	1 640\$	1 640\$	1 640\$

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
Mexique	1 420\$	1 450\$	1 450\$	1 499\$	1 499\$
Micronésie, États fédérés de	1 045\$	1 045\$	1 045\$	1 045\$	1 045\$
Moldova	1 765\$	1 545\$	1 545\$	1 545\$	1 510\$
Monaco					
Mongolie	2 131\$	2 265\$	2 555\$	2 745\$	2 745\$
Monténégro	940\$	935\$	985\$	985\$	985\$
Mozambique	1 100\$	1 100\$	1 100\$	1 100\$	1 100\$
Myanmar			670\$	670\$	620\$
Namibie	1 686\$	1 800\$	1 800\$	1 750\$	1 650\$
Népal	1 960\$	1 960\$	1 975\$	2 295\$	2 545\$
Nicaragua	1 140\$	1 140\$	1 140\$	1 140\$	1 140\$
Niger	3 343\$	3 343\$	3 474\$	4 475\$	4 475\$
Nigéria	1 263\$	1 263\$	1 380\$	1 564\$	1 564\$
Norvège	1 055\$	1 055\$	1 225\$	1 225\$	1 265\$
Nouvelle-Calédonie					
Nouvelle-Zélande	855\$	855\$	870\$	870\$	870\$
Oman	725\$	745\$	745\$	745\$	765\$
Ouganda	2 780\$	2 880\$	3 050\$	2 800\$	2 800\$
Ouzbékistan	4 285\$	4 285\$	4 585\$	4 785\$	5 090\$
Pakistan	611\$	660\$	660\$	765\$	765\$
Palaos	720\$	720\$	720\$	720\$	720\$
Panama	565\$	615\$	615\$	625\$	665\$
Papouasie-Nouvelle-Guinée	1 064\$	1 064\$	1 149\$	1 149\$	1 335\$
Paraguay	1 440\$	1 440\$	1 440\$	1 850\$	1 850\$
Pays-Bas	925\$	925\$	925\$	925\$	915\$
Pérou	860\$	860\$	890\$	890\$	890\$
Philippines	630\$	630\$	585\$	585\$	755\$
Pologne	884\$	1 050\$	1 050\$	1 050\$	1 050\$
Polynésie française					
Porto Rico	1 250\$	1 300\$	1 300\$	1 300\$	1 300\$
Portugal	730\$	730\$	730\$	780\$	780\$
Qatar	777\$	902\$	927\$	927\$	927\$
Région administrative spéciale de Macao, Chine					
République arabe syrienne	1 190\$	1 190\$	1 190\$	1 740\$	1 995\$
République centrafricaine	5 491\$	5 491\$	5 491\$	5 490\$	5 490\$
République démocratique populaire lao	1 860\$	1 880\$	2 140\$	1 950\$	1 950\$
République dominicaine	916\$	1 040\$	1 040\$	1 040\$	1 040\$
République kirghize	3 010\$	3 210\$	4 160\$	4 360\$	4 760\$

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
République slovaque	1 530\$	1 560\$	1 560\$	1 500\$	1 525\$
République tchèque	1 120\$	1 120\$	1 205\$	1 215\$	1 240\$
Roumanie	1 275\$	1 485\$	1 485\$	1 485\$	1 485\$
Royaume-Uni	1 000\$	1 000\$	1 000\$	1 005\$	1 005\$
Rwanda	3 275\$	3 275\$	3 245\$	3 245\$	3 245\$
Sainte-Lucie	905\$	905\$	905\$	935\$	935\$
Saint-Kitts-et-Nevis	500\$	500\$	805\$	805\$	805\$
Saint-Marin			1 900\$	1 900\$	1 900\$
Saint-Martin (fr)					
Saint-Vincent-et-les Grenadines	585\$	585\$	585\$	585\$	585\$
Samoa	490\$	490\$	490\$	490\$	490\$
Samoa américaines					
Sao Tomé-et-Principe	690\$	690\$	690\$	690\$	690\$
Sénégal	1 228\$	1 228\$	1 228\$	1 225\$	1 225\$
Serbie	1 398\$	1 433\$	1 455\$	1 455\$	1 635\$
Seychelles	876\$	876\$	876\$	705\$	705\$
Sierra Leone	1 373\$	1 373\$	1 185\$	1 185\$	1 185\$
Singapour	456\$	456\$	456\$	460\$	460\$
Sint Maarten (Dutch part)					
Slovénie	710\$	710\$	745\$	745\$	745\$
Somalie					
Soudan	2 050\$	2 050\$	2 050\$	2 050\$	2 630\$
Soudan du Sud			5 335\$	5 335\$	5 335\$
Sri Lanka	590\$	590\$	595\$	595\$	560\$
Suède	717\$	717\$	725\$	725\$	725\$
Suisse	1 562\$	1 562\$	1 460\$	1 660\$	1 660\$
Suriname	995\$	995\$	1 000\$	1 000\$	1 050\$
Swaziland	1 754\$	1 855\$	1 880\$	1 880\$	1 980\$
Tadjikistan	3 350\$	3 850\$	8 450\$	8 650\$	9 050\$
Tanzanie	1 262\$	1 255\$	1 040\$	1 090\$	1 090\$
Tchad	5 902\$	5 902\$	5 902\$	6 615\$	6 615\$
Thaïlande	625\$	625\$	585\$	595\$	595\$
Timor-Leste	410\$	410\$	410\$	410\$	410\$
Togo	940\$	940\$	940\$	1 015\$	1 015\$
Tonga	400\$	525\$	505\$	505\$	515\$
Trinité-et-Tobago	808\$	843\$	843\$	843\$	843\$
Tunisie	773\$	773\$	773\$	775\$	805\$
Turkménistan					
Turquie	990\$	990\$	990\$	990\$	990\$

Nom du pays	2010	2011	2012	2013	2014
Tuvalu					
Ukraine	1 560\$	1 865\$	1 865\$	1 930\$	1 880\$
Uruguay	1 100\$	1 100\$	1 125\$	1 125\$	1 125\$
Vanuatu	1 340\$	1 490\$	1 490\$	1 490\$	1 490\$
Venezuela	2 590\$	2 590\$	2 590\$	3 490\$	3 490\$

ANNEXE II

LISTE DES ADRESSES DES ENTREPRISES DE L'ÉTUDE DE CAS

Entreprise	Adresse
F1	Huangjing, Wangcheng, Changsha, Hunan, 410217, China.
F2	NO.6 Xinguang Road, Xieqiao industrial Park, Haining, Zhejiang, China.
C1	121 Pan American Drive, Gaffney, SC, USA, 29341.
C2	1020 André-Liné Street, Granby QC, J2J 1J9, Canada.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Absi, Nabil, Stéphane Dauzère-Pérès, Safia Kedad-Sidhoum, Bernard Penz et Christophe Rapine. 2013. « Lot sizing with carbon emission constraints ». *European Journal of Operational Research*, vol. 227, n° 1, p. 55-61.
- Alharbi, Abdurahim, Shuaian Wang et Pam Davy. 2014. « Schedule design for sustainable container supply chain networks with port time windows ». *Advanced Engineering Informatics*.
- Almeder, Christian, Diego Klabjan, Renate Traxler et Bernardo Almada-Lobo. 2015. « Lead time considerations for the multi-level capacitated lot-sizing problem ». *European Journal of Operational Research*, vol. 241, n° 3, p. 727-738.
- Álvarez-SanJaime, Óscar, Pedro Cantos-Sánchez, Rafael Moner-Colonques et José J. Sempere-Monerris. 2013. « Vertical integration and exclusivities in maritime freight transport ». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 51, n° 0, p. 50-61.
- Amer, L.E., et AB Eltawil. 2014. « Collaborative sustainable supply chain network design: state of the art and solution framework ». *Proceedings of CIE44 & IMSS'14*.
- Ankersmit, Steven, Jafar Rezaei et Lori Tavasszy. 2014. « The potential of horizontal collaboration in airport ground freight services ». *Journal of Air Transport Management*, vol. 40, n° 0, p. 169-181.
- Bahinipati, Bikram K. et S. G. Deshmukh. 2012. « Vertical collaboration in the semiconductor industry: A decision framework for supply chain relationships ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62, n° 2, p. 504-526.
- Bahinipati, Bikram K., Arun Kanda et S. G. Deshmukh. 2009. « Horizontal collaboration in semiconductor manufacturing industry supply chain: An evaluation of collaboration intensity index ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, n° 3, p. 880-895.
- Bassett, Matt, et Leslie Gardner. 2013. « Designing optimal global supply chains at Dow AgroSciences ». *Annals of Operations Research*, vol. 203, n° 1, p. 187-216.
- Becker, T., I. Dammer, J. Howaldt et A. Loose. 2011. « Netzwerkmanagement: Mit Kooperation zum Unternehmenserfolg, 2 ». *Auflage, Berlin/Heidelberg*.
- Beliveau, Martin. 2010. « Consolidation des commandes dans la grande distribution ». Québec, Université Laval, 102 p p.

- Benjaafar, Saif, Yanzhi Li et Mark Daskin. 2013. « Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models ». *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 10, n° 1, p. 99-116.
- Bhatnagar, Rohit, Peeyush Mehta et Chee Chong Teo. 2011. « Coordination of planning and scheduling decisions in global supply chains with dual supply modes ». *International Journal of Production Economics*, vol. 131, n° 2, p. 473-482.
- Bookbinder, James H., et James K. Higginson. 2002. « Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage ». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 38, n° 5, p. 305-318.
- Brahimi, Nadjib, Stéphane Dauzere-Peres, Najib M. Najid et Atle Nordli. 2006. « Single item lot sizing problems ». *European Journal of Operational Research*, vol. 168, n° 1, p. 1-16.
- Brandenburg, Marcus, Kannan Govindan, Joseph Sarkis et Stefan Seuring. 2014. « Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions ». *European Journal of Operational Research*, vol. 233, n° 2, p. 299-312.
- Buijs, Paul et J.C. Wortmann. 2014. « Joint operational decision-making in collaborative transportation networks: the role of IT ». *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 19, n° 2, p. 200-210.
- Bushuev, Maxim A., Alfred Guiffrida, M. Y. Jaber et Mehmood Khan. 2015. « A review of inventory lot sizing review papers ». *Management Research Review*, vol. 38, n° 3, p. 283-298.
- Cadarso, María-Ángeles, Luis-Antonio López, Nuria Gómez et María-Ángeles Tobarra. 2010. « CO2 emissions of international freight transport and offshoring: Measurement and allocation ». *Ecological Economics*, vol. 69, n° 8, p. 1682-1694.
- Chaabane, Amin, Amar Ramudhin et Marc Paquet. 2012. « Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme ». *International Journal of Production Economics*, vol. 135, n° 1, p. 37-49.
- Chan, Felix T.S., et T. Zhang. 2011. « The impact of Collaborative Transportation Management on supply chain performance: A simulation approach ». *Expert Systems with Applications*, vol. 38, n° 3, p. 2319-2329.
- Chengxuan, Cao, J. S. K. Ang et Ye Hengqing. 2005. « Cargo mix and shipment planning problem with uncertainty ». In *Services Systems and Services Management, 2005. Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference on*. (13-15 June 2005) Vol. 1, p. 305-310 Vol. 1.

- Chien, M.K., et Li-Hsing Shih. 2007. « An empirical study of the implementation of green supply chain management practices in the electrical and electronic industry and their relation to organizational performances ».
- Coyle, John J.; Robert A. Novack; Brian J. Gibson ; Edward j.Bardi (506p). 2011. *Transportation : a supply chain perspective*. United States of America: South-Western.
- Cristea, Anca, David Hummels, Laura Puzzello et Misak Avetisyan. 2013. « Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport ». *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 65, n° 1, p. 153-173.
- CTM. 2004. *Collaborative Transportation Management White Paper*.
- Dumont, Jean. 2013. « LE MARCHÉ DU CARBONE DU QUÉBEC (SPEDE) : ANALYSE ET ENJEUX ». Montréal, Université de Sherbrook, 160 p.
- Eskigun, Erdem, Reha Uzsoy, Paul V. Preckel, George Beaujon, Subramanian Krishnan et Jeffrey D. Tew. 2005. « Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers ». *European Journal of Operational Research*, vol. 165, n° 1, p. 182-206.
- Fahimnia, Behnam, Joseph Sarkis, John Boland, Mohsen Reisi et Mark Goh. 2014a. « Policy insights from a green supply chain optimisation model ». *International Journal of Production Research*, n° ahead-of-print, p. 1-12.
- Fahimnia, Behnam, Joseph Sarkis, Alok Choudhary et Ali Eshragh. 2014b. « Tactical supply chain planning under a carbon tax policy scheme: A case study ». *International Journal of Production Economics*.
- Glock, Christoph H., Eric H. Grosse et Jörg M. Ries. 2014. « The lot sizing problem: A tertiary study ». *International Journal of Production Economics*, vol. 155, n° 0, p. 39-51.
- Godichaud, Matthieu, et Lionel Amodeo. 2015. « Efficient multi-objective optimization of supply chain with returned products ». *Journal of Manufacturing Systems*.
- Guajardo, Mario et Mikael Rönnqvist. 2015. « Operations research models for coalition structure in collaborative logistics ». *European Journal of Operational Research*, vol. 240, n° 1, p. 147-159.
- Juan, Angel A., Javier Faulin, Elena Pérez-Bernabeu et Nicolas Jozefowicz. 2014. « Horizontal Cooperation in Vehicle Routing Problems with Backhauling and Environmental Criteria ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, n° 0, p. 1133-1141.

- Kallrath, Josef. 2002. « Planning and scheduling in the process industry ». *OR Spectrum*, vol. 24, n° 3, p. 219-250.
- Lee, Amy H. I., He-Yau Kang et Chun-Mei Lai. 2011. « Solving lot-sizing problem with quantity discount and transportation cost ». *International Journal of Systems Science*, vol. 44, n° 4, p. 760-774.
- Li, Zichao, James H. Bookbinder et Samir Elhedhli. 2012. « Optimal shipment decisions for an airfreight forwarder: Formulation and solution methods ». *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 21, n° 1, p. 17-30.
- Manuj, Ila et John T. Mentzer. 2008. « Global supply chain risk management strategies ». *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 38, n° 3, p. 192-223.
- Mason, Robert, Chandra Lalwani et Roger Boughton. 2007. « Combining vertical and horizontal collaboration for transport optimisation ». *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 12, n° 3, p. 187-199.
- Montreuil, Benoit. 2011. « Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge ». *Logistics Research*, vol. 3, n° 2-3, p. 71-87.
- Morali, Oguz et Cory Searcy. 2013. « A Review of Sustainable Supply Chain Management Practices in Canada ». *Journal of business ethics*, vol. 117, n° 3, p. 635-658.
- Neilson, Jeffrey et Bill Pritchard. 2007. « Green coffee? The contradictions of global sustainability initiatives from an Indian perspective ». *Development Policy Review*, vol. 25, n° 3, p. 311-331.
- Pomponi, Francesco, Luciano Fratocchi et Silvia Rossi Tafuri. 2015. « Trust development and horizontal collaboration in logistics: a theory based evolutionary framework ». *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 20, n° 1, p. 83-97.
- Pruzan-Jorgensen, Peder Michael. 2010. *Sustainability Tends in the Container Shipping Industry*. <http://www.bsr.org/reports/BSR_Sustainability_Trends_Container_Shipping_Industry.pdf>.
- Sanchez, David, Lionel Amodeo et Christian Prins. 2010. « Meta-heuristic Approaches for Multi-objective Simulation-based Optimization in Supply Chain Inventory Management ». In *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*. p. 249-269. Springer.

- Seuring, Stefan et Martin Müller. 2008. « From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, n° 15, p. 1699-1710.
- Shah, Nikisha K. et Marianthi G. Ierapetritou. 2012. « Integrated production planning and scheduling optimization of multisite, multiproduct process industry ». *Computers & Chemical Engineering*, vol. 37, n° 0, p. 214-226.
- Skjøtt-Larsen, Tage, Philip B Schary, Juliana Hsuan Mikkola et Herbert Kotzab. 2007. *Managing the global supply chain*. Copenhagen Business School Press.
- Tyan, J.C., F.K. Wang et T. Du. 2003. « Applying collaborative transportation management models in global third-party logistics ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 16, n° 4-5, p. 283-291.
- Vanovermeire, Christine, Kenneth Sørensen, Alex Van Breedam, Bart Vannieuwenhuyse et Sven Verstrepen. 2013. « Horizontal logistics collaboration: decreasing costs through flexibility and an adequate cost allocation strategy ». *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 17, n° 4, p. 339-355.
- Verderame, Peter M. et Christodoulos A. Floudas. 2009. « Operational planning framework for multisite production and distribution networks ». *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, n° 5, p. 1036-1050.
- Wang, Xin, Herbert Kopfer et Michel Gendreau. 2014. « Operational transportation planning of freight forwarding companies in horizontal coalitions ». *European Journal of Operational Research*, vol. 237, n° 3, p. 1133-1141.
- Yalaoui, Alice, Hicham Chehade, Farouk Yalaoui et Lionel Amodeo. 2012. *Optimization of Logistics*. John Wiley & Sons.
- Yan, Shangyao, Chun-Ying Chen et Shih-Chun Lin. 2009. « Ship scheduling and container shipment planning for liners in short-term operations ». *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 14, n° 4, p. 417-435.